

ISSN 0044-3948

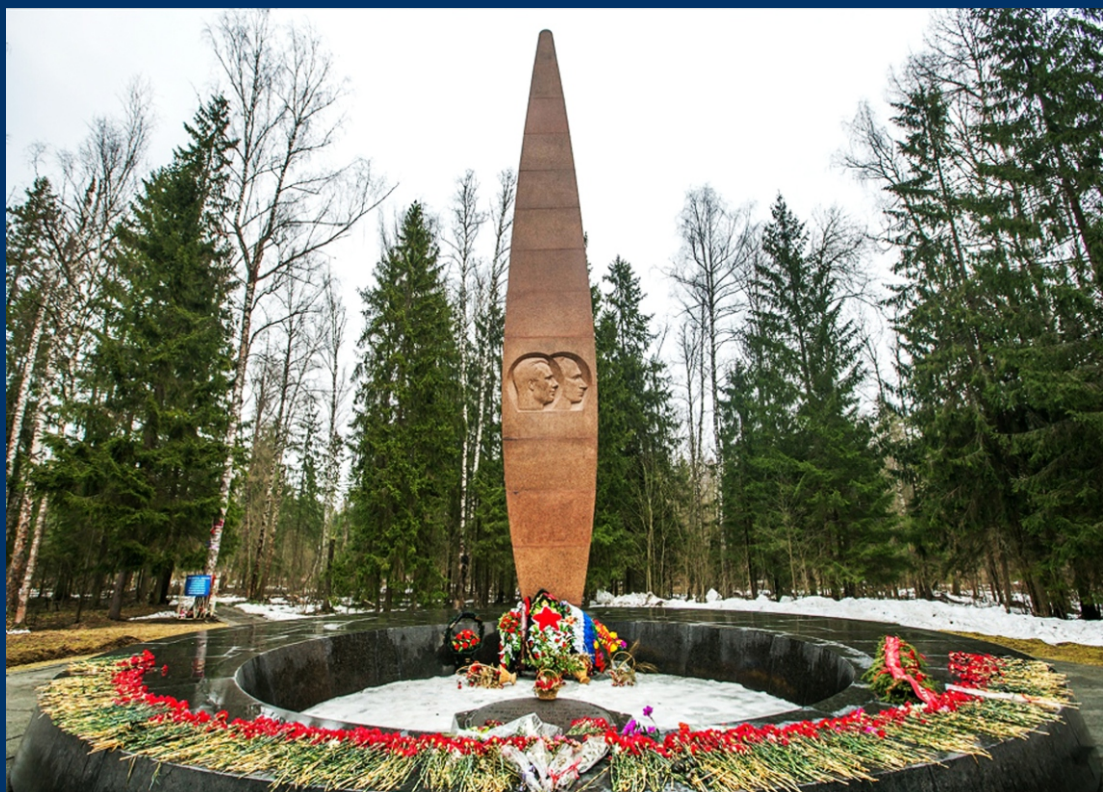
ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

КОСМОНАВТИКА
АСТРОНОМИЯ
ГЕОФИЗИКА

ИЮЛЬ-АВГУСТ

4/2018





Научно-популярный журнал
Российской академии наук
Издается под руководством
Президиума РАН
Выходит с января 1965 года
6 раз в год
Москва

Земля и Вселенная

4/2018



Новости науки и другая информация:

"Хаябуса-2" сфотографировала астероид Рюгу [15]; Гипотеза о возможности обнаружения темной материи [29]; Нейтронная звезда в Туманности Андромеды [46]; Сверхпузыри газа вокруг галактик [62]; "ЭкзоМарс-2020": испытания парашютной системы [63]; Российский прибор продолжает работу на Марсе [63]; Изменения на Церере [64]; Испытания обсерватории Уэбба [102]; Памяти Ю.А. Гагарина [103]; "Радиоастрон": находка водяного мазера [107]; Трехмерная модель солнечной ударной волны [108]; Вода появилась сразу после рождения Земли [109]; Как возникли малые спутники Сатурна [110].

В номере:

- 3 ЗЕЛЁНЫЙ Л.М. Дорога к Марсу. В поисках воды и жизни
- 16 ШУСТОВ Б.М., НАРОЕНКОВ С.А. Как найти опасный астероид, пока он не нашел нас
- 30 ПОТЕХИН А.Ю. Физика нейтронных звезд
- 47 ЗЕЛЕНЧУК А.В., КРЫЛЕНКОВ В.А., ЗЕЛЕНЧУК В.А. Зонды для исследования ледяных щитов Земли и других небесных тел

СЛУЖБА СОЛНЦА

- 65 ИШКОВ В.Н. Солнце в феврале – марте 2018 г.

ЛЮДИ НАУКИ

- 68 ГРИБКО Л.П., ПОНОМАРЁВА Г.А. Витольд Карлович Цераский
- 81 СУДАКОВ В.С., РАХМАНИН В.Ф. Борис Сергеевич Петропавловский (к 120-летию со дня рождения)

ИСТОРИЯ НАУКИ

- 90 Открыто новое окно во Вселенную (российский вклад)



© Российская академия наук, 2018
© Редакция журнала
«Земля и Вселенная». Составление, 2018

Zemlya i Vseennaya (Earth and Universe); Moscow, Profsoyuznaya str., 90, f. 1965, 6 a year; Joint edition of the Russian Academy of Science; popular, current hypotheses of the origin and development of the Earth and Universe; astronomy, geophysics and space research; Deputy Editor V.M. Kotlyakov; Deputy Editor S.P. Perov

На стр. 1 обложки: Спиральная галактика M31 Туманность Андромеды, удаленная от нас на расстояние в 2,52 млн св. лет. В ней обнаружена быстро вращающаяся нейтронная звезда – источник 3XMM J004301.4+413017. Снимок получен 28 января 2011 г. в рентгеновском диапазоне 0,3–7,0 кэВ с помощью космической обсерватории "XMM-Newton". ESA/Herschel/PACS/ SPIRE; В. Питч (к стр. 46).

На стр. 2 обложки: вверху – летчик-космонавт Ю.А. Гагарин в кабине самолета МиГ-17 готовится к вылету (аэродром Чкаловский, 1967 г.); внизу – 16-м стела Мемориала на месте гибели Героев Советского Союза Ю.А. Гагарина и В.С. Серегина. Деревня Новоселово Киржачского района Владимирской области. Фото от 27 марта 2018 г. (к стр. 103).

На стр. 3 обложки: Расширяющиеся огромные газовые пузыри обнаружены вокруг черных дыр ярких радиогалактик TXS0211–122 и TXS 0828+193 (11,5 млрд св. лет от нас). Снимок получен в 2018 г. с помощью 10-м телескопов Кека II (Гавайи) и Большого Канарского телескопа. Справа – рисунок художника (к стр. 63); внизу – извлечение оптических и научных блоков космической обсерватории им. Уэбба (JWST) из контейнера в помещении компании "Нортроп" в Калифорнии для заключительных испытаний. Снимок получен 8 марта 2018 г. Фото NASA (к стр. 62).

На стр. 4 обложки: Молодое звездное скопление NGC 602 возрастом 5 млн лет, окруженное газопылевым облаком, из которого оно сформировалось, расположено на окраине Малого Магелланова Облака (200 тыс. св. лет от нас). Снимок получен 24 марта 2018 г. в инфракрасном и рентгеновском диапазонах с помощью КТХ и космических обсерваторий "Спитцер" и "Чандра". Фото NASA, ESA, JPL, STScI; Л. Оскинова.

In this issue:

- 3 ZELENYI L.M. Road to Mars. In Search for Water and Life
- 16 SHUSTOV B.M., NAROENKOV S.A. How to find the Hazardous Asteroid before it finds us
- 30 POTEKHIN A.YU. The Physics of Neutron Stars
- 47 ZELENCHUK A.V., KRYLENKOV V.A., ZELENCHUK V.A. Probes for Sensing Ice Shields of Earth and other Celestial Bodies

SOLAR MONITORING SERVICE

- 65 ISHKOV V.N. The Sun in February – March 2018

PEOPLE OF SCIENCE

- 68 GRIBKO L.P., PONOMAREVA G.A. Witold Karlovich Ceraskiy
- 81 SUDAKOV V.S., RAKHMANIN V.F. Boris Sergeyevich Petropavlovskiy (to the 120th Anniversary of Birth)

HISTORY OF SCIENCE

- 90 Contribution of Russian Scientists to the Discovery of Gravitational Waves

Редакционная коллегия

главный редактор академик Л.М. ЗЕЛЁНЫЙ
зам. главного редактора доктор физ.-мат. наук С.П. ПЕРОВ,
зам. главного редактора академик В.М. КОТЛЯКОВ,
летчик-космонавт П.В. ВИНОГРАДОВ,
зам. главного редактора кандидат филологических наук О.В. ЗАКУТНЯЯ,
доктор исторических наук К.В. ИВАНОВ,
летчик-космонавт А.Ю. КАЛЕРИ, кандидат физ.-мат. наук О.Ю. ЛАВРОВА,
доктор физ.-мат. наук А.А. ЛУТОВИНОВ, зам. главного редактора доктор физ.-мат. наук О.Ю. МАЛКОВ,
доктор физ.-мат. наук И.Г. МИТРОФАНОВ, академик И.И. МОХОВ,
член-корр. РАН И.Д. НОВИКОВ, доктор физ.-мат. наук К.А. ПОСТНОВ,
доктор физ.-мат. наук М.В. РОДКИН,
научный директор Московского планетария Ф.Б. РУБЛЁВА,
член-корр. РАН А.Л. СОБИСЕВИЧ, член-корр. РАН В.А. СОЛОВЬЁВ,
академик А.М. ЧЕРЕПАЩУК, доктор физ.-мат. наук В.В. ШЕВЧЕНКО,
член-корр. РАН Б.М. ШУСТОВ

Дорога к Марсу. В поисках воды и жизни

Л.М. ЗЕЛЁНЫЙ,
академик
научный руководитель
Института космических исследований РАН

Прошло уже больше 50 лет с тех пор, как в фильме "Карнавальная ночь" устами Сергея Филиппова был озвучен вопрос, ответ на который пока все еще остается прежним: "Есть ли жизнь на Марсе, нет ли жизни на Марсе – науке не известно. Наука еще пока не в курсе дела". За те полвека, что прошло со времени выхода на экраны этого фильма, мы узнали много нового о таинственной красной планете и процессах, происходящих на ней, но даже сейчас на-



ших знаний недостаточно, для того, чтобы ответить на вопрос о том, есть ли жизнь на Марсе.

Пейзаж Марса не слишком привлекателен; глядя на него, можно подумать: "Чего же там такого интересного? Зачем нам вообще нужно изучать эту мертвую планету-пустыню?!". Однако ответ весьма прозаичен и прост: в пределах Солнечной системы Марс – единственный возможный потенциальный кандидат на роль запасной планеты для человечества.

В середине XX в., в самом начале космической эры, мы еще слишком мало знали о нашей Солнечной системе. Предполагалось, что, например, Венера тоже вполне может быть обитаема. В 1959 г. вышло в свет первое крупное произведение братьев А. и Б. Стругац-

ких "Страна багровых туч", где главные герои пробираются через венерианские джунгли, охотясь на обитающих в них зверей. Однако позже стало известно, что Венера – самый настоящий раскаленный ад с колоссальным давлением, где ни человек, ни привычные

нам формы жизни ни при каких условиях существовать не смогут.

Венера, Земля и Марс находятся в так называемой зоне обитаемости – на такой удаленности от Солнца, где не слишком тепло и не слишком холодно, – то есть где гипотетически

возможно существование жизни в человеческом ее представлении.

На планетах-гигантах солнечного света уже слишком мало; Меркурий же, наоборот, расположен к светилу слишком близко. Таким образом, пригоден для гипотетического заселения в далеком будущем только Марс.

Однако планеты зоны обитаемости, несмотря на формальное сходство, разительно отличаются друг от друга. Марс примерно в два раза меньше Земли. Во время формирования Солнечной системы большое количество вещества, которое могло бы попасть на планету, было захвачено находящимся по соседству Юпитером.

В связи с этим перед первыми марсианскими аппаратами встала одна проблема – ученые рассчитывали, что, как и у Земли, у Марса есть магнитное поле, которое надежно защищает и человека, и чувствительные электронные приборы от разрушительного действия энергичных солнечных заряженных частиц и галактических космических лучей, но магнитного поля у Марса не оказалось.

От его отсутствия пострадала и атмосфера планеты: с помощью данных, полученных с помощью первых марсианских аппаратов, ученые наблюдали механизм взаимодействия марсианской атмосферы с солнечным ветром. Исследования показали, что электромагнитные поля,

переносимые потоками частиц солнечной плазмы, взаимодействуют с атмосферными атомами, "подхватывают" их и просто "обдирают" ее как кожуру с апельсина. Дело в том, что магнитное поле планеты возникает из-за токов в жидком ядре планеты; но из-за недостатка массы Марс слишком быстро остыл и токи в ядре затухли, в результате чего пропало магнитное поле, а вместе с ним начала улетучиваться атмосфера.

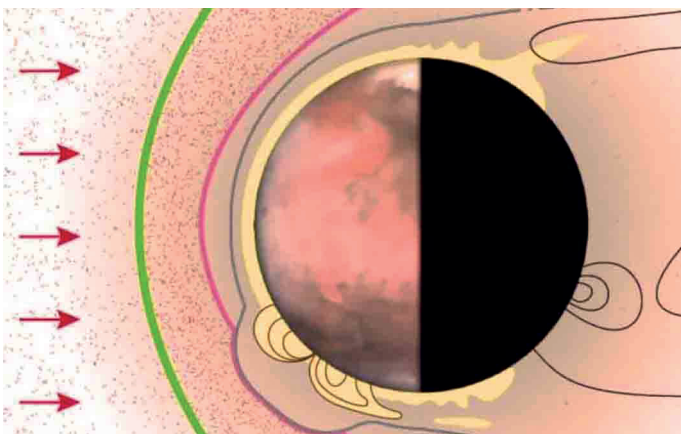
Как стало понятно позже, за счет больших вкраплений железа небольшое, вторичное магнитное поле у Марса все же нашлось в Южном полушарии, но оно не может удерживать атмосферу. В настоящее время давление его более чем в 150 раз меньше давления атмосферы на поверхность Земли.

В отличие от земной атмосферы, состоящей в ос-

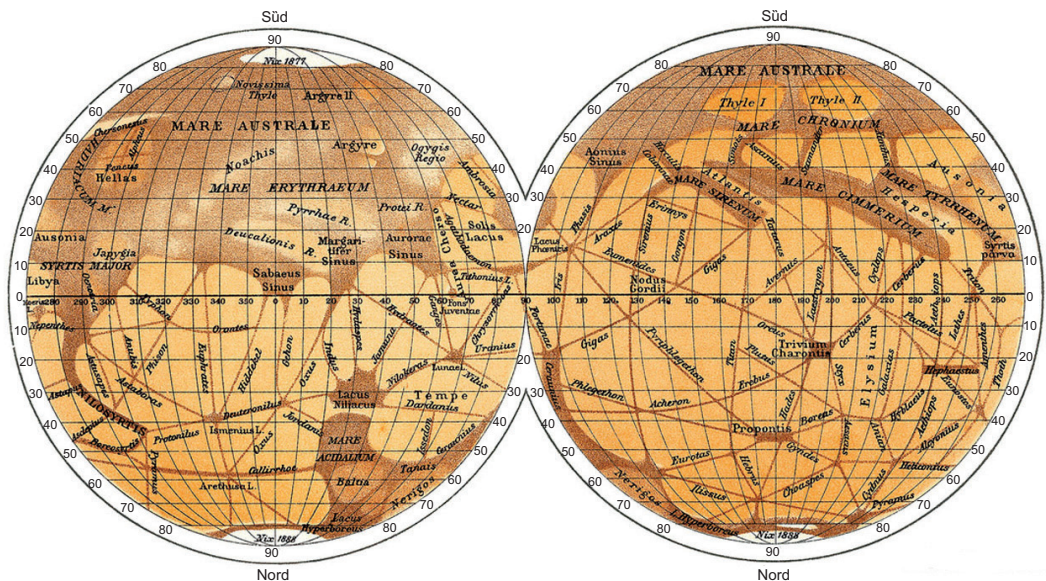
новном из азота, кислорода и углекислого газа, атмосфера на Марсе почти вся состоит из углекислого газа с небольшим количеством примесей водяного пара. Из-за слабой плотности атмосферы парниковый эффект "добавляет" температуре Марса всего лишь около 4 К, в отличие от земных 39 К и венерианских 500 К.

На Марсе имеет место ярко выраженная смена времен года, что во многом обусловлено вытянутой орбитой и ее наклоном, которое составляет примерно 25° (что на 2° больше наклона орбиты Земли). Наименее сильно температура на поверхности понижается во время марсианской зимы, когда планета находится в афелии – в точке, наиболее удаленной от Солнца.

Лето на Марсе приносит свирепые пылевые бури, возникающие из-за чрез-



"Обдираание" атмосферы Марса солнечным ветром. Рисунок NASA.



Карта Марса Джованни Скиапарелли с нанесенными на нее каналами. 1879 г.

вычайно сильных ветров, они наблюдаются даже с Земли. Эти бури получили название "пылевые дьяволы", их сокрушительная мощь была вполне реалистично изображена в фильме "Марсианин" (2015 г.). Для гипотетических будущих пилотируемых экспедиций на Марс эти бури действительно представляют большую угрозу.

Еще в 1877 г. итальянский астроном Джованни Скиапарелли (1835–1910; Земля и Вселенная, 2010, № 5) при наблюдении Марса в телескоп обнаружил на нем "каналы", которые потом еще долго считались "прорытой" марсианами ирригационной сетью. Недопонимание, судя по всему, было вызвано неточностями

перевода: итальянское слово *canali* переводится не только как "канал" но и как "канавка" или "русло".

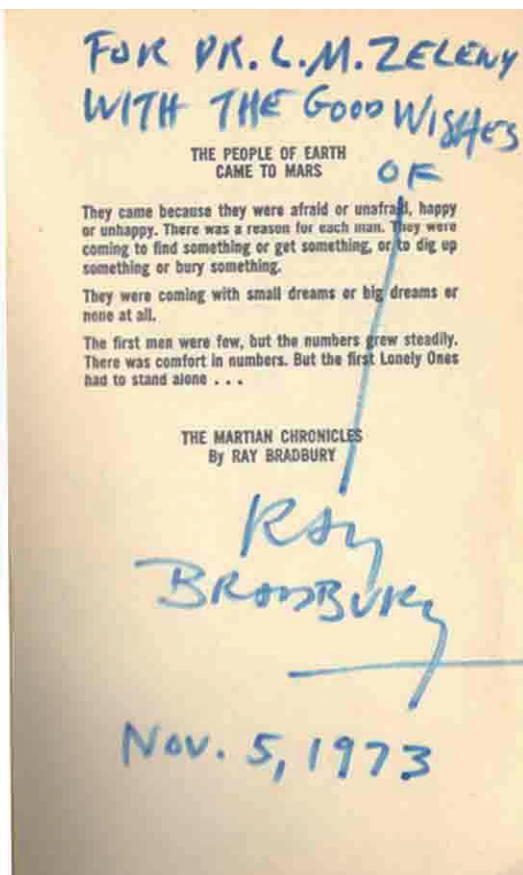
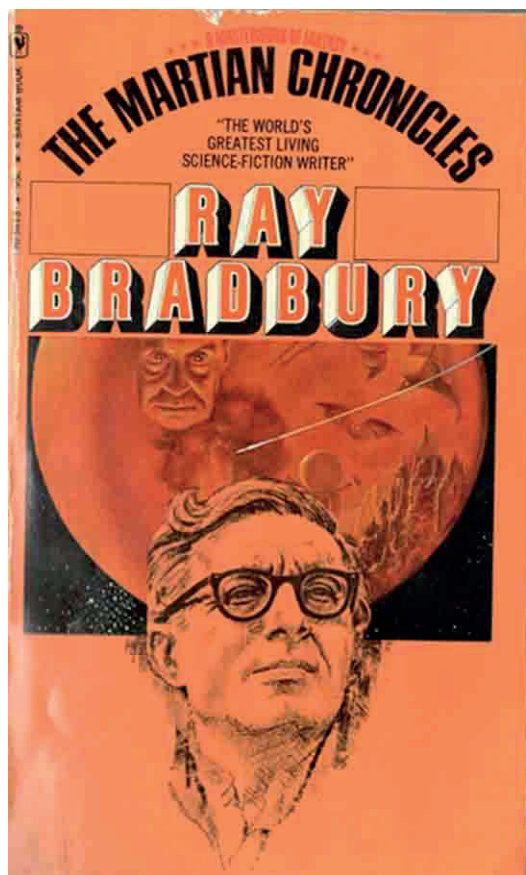
Чуть позже, в конце XIX в., астроном Персиваль Лоуэлл (1855–1916) продолжил развивать идею обитаемости Марса, что во многом подвигло Герберта Уэллса к написанию книги "Война миров", один из последних фильмов по мотивам данной книги вышел на экраны в 2005 г.

В то же время в науке вполне серьезно возникло такое направление, как астроботаника. Так академик АН КазССР Гавриил Тихов (1875–1960; Земля и Вселенная, 1975, № 6; 2003, № 3) объяснял изменение цвета поверхности Марса густой растительностью, меняющ-

ей свои оптические свойства и способной поглощать солнечную радиацию в зависимости от климатических условий.

Марс был очень популярен и в литературе: многие русские поэты, в том числе Константин Бальмонт, Николай Заболоцкий посвящали свои стихи таинственной планете. Алексей Толстой в книге "Аэлита" (1923) представил свое видение утонченной и хрупкой марсианской цивилизации, а также описал ее "столкновение" с суровой советской действительностью.

В 1950 г. был опубликован научно-фантастический роман "Марсианские хроники" американского писателя Рея Бредбери, не теряющий популярность и по сей день.



Обложка книги Рея Бредбери "Марсианские хроники", подписанная автором. Из личной библиотеки Л.М. Зелёного.

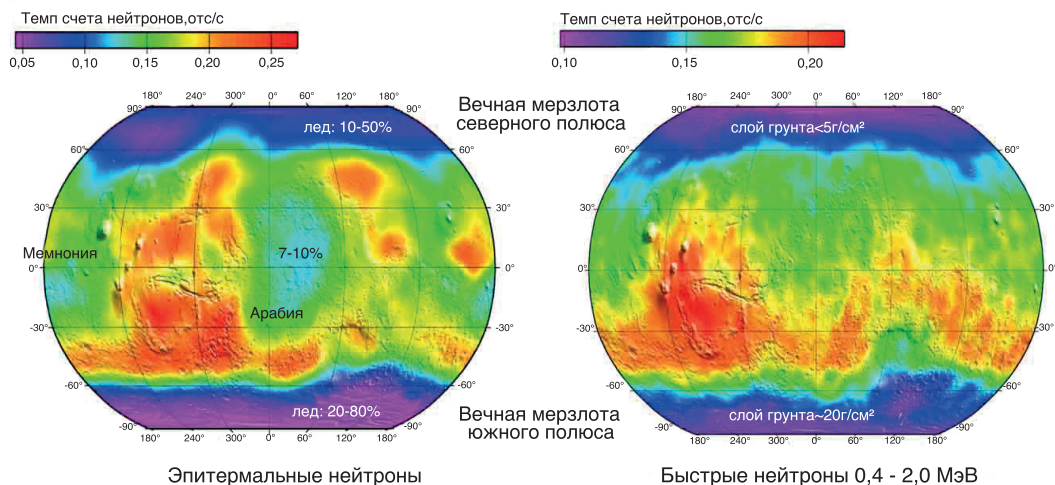
Лозунг "Вперед, на Марс!" провозгласила для себя Группа изучения реактивного движения (ГИРД; Земля и Вселенная, 1981, № 5; 1993, № 5), куда входил и Главный конструктор страны Сергей Павлович Королёв, под чьим руководством уже в 1960-е гг. готовились проекты первых автоматических межпланетных марсианских станций.

Начиная с ноября 1962 г., к Марсу было совершено более 40 запусков автоматичес-

ких межпланетных станций (АМС), примерно половина из них увенчалась успехом. С помощью первых советских марсианских аппаратов успели получить ряд очень интересных результатов, но в 1980-х и 1990-х гг. отечественную марсианскую программу преследовали тяжёлые неудачи: лишь частично удался проект "Фобос" (АМС "Фобос-1" и "Фобос-2" стартовали в июле 1988 г.; Земля и Вселенная, 1989, №№ 5, 6);

так и не достигла Красной планеты межпланетная станция по проекту "Марс-96", потерпев аварию во время запуска 16 ноября 1996 г. (Земля и Вселенная, 1994, № 4; 1996, № 4). Катастрофой закончилась и следующая экспедиция к Фобосу по проекту "Фобос-Грунт" 9 ноября 2011 г. (Земля и Вселенная, 2011, № 4; 2012, № 2, с. 106–107).

Новая волна интереса к Марсу, тем не менее, воз-



Карты полушарий Марса с указанием количества воды в грунте. В 2002 г. данные измерений, полученные с помощью прибора ХЕНД, позволили обнаружить марсианскую "вечную мерзлоту" с высоким содержанием водяного льда. По данным NASA.

ника в 2000-х гг., после обнаружения в подповерхностном слое марсианского грунта запасов водяного льда. Важную роль в этих открытиях "сыграл" разработанный в ИКИ РАН (Отдел ядерной планетологии ИКИ РАН под руководством И.Г. Митрофанова) прибор ХЕНД (High Energy Neutron Detector – детектор высокоэнергетических нейтронов), установленный на американской АМС "Марс Одиссей", запущенной 7 апреля 2001 г. и уже более 16 лет работающей на орбите Марса (Земля и Вселенная, 2001, № 5, с. 20–22; 2015, № 1, с. 39–40).

Поверхность Марса постоянно бомбардируется частицами солнечного ветра, галактическими космическими лучами. Это частицы

очень больших энергий, проникающие на глубину 1,5–2 м и выбивающие из грунта нейтроны, которые стремятся вырваться наружу. Атомы водорода (сравнимые по массе с такими частицами) задерживают выход нейтронов, поэтому если в подповерхностном слое содержится водород, то прибор фиксирует в этой области падение потока нейтронов. Много богатых водородом областей было обнаружено в полярных районах, но подобные участки были обнаружены и на экваторе, что очень интересно. С помощью прибора ХЕНД была составлена первая, а затем многократно уточнявшаяся карта распределения воды на Марсе.

Следующий этап в изучении Марса был реализо-

ван благодаря европейской миссии "Марс Экспресс", запущенной 2 июня 2003 г., вышедшей на орбиту Марса 25 декабря 2003 г. (Земля и Вселенная, 2004, № 1, с. 35–36; 2004, № 3, с. 21–22; 2012, № 6, с. 27–28). Незадолго до этого потерпел неудачу российский проект "Марс-96". Повторить его полностью страна уже не могла, но остался хороший задел по научным приборам, благодаря которому российские разработчики были приглашены провести свои эксперименты в рамках европейского проекта. На этом аппарате стояло три прибора с российским участием: спектрометры OMEGA, PFS и SPICAM (Земля и Вселенная, 2006, № 2). "Марс Экспресс" с помощью спектрометров PFS

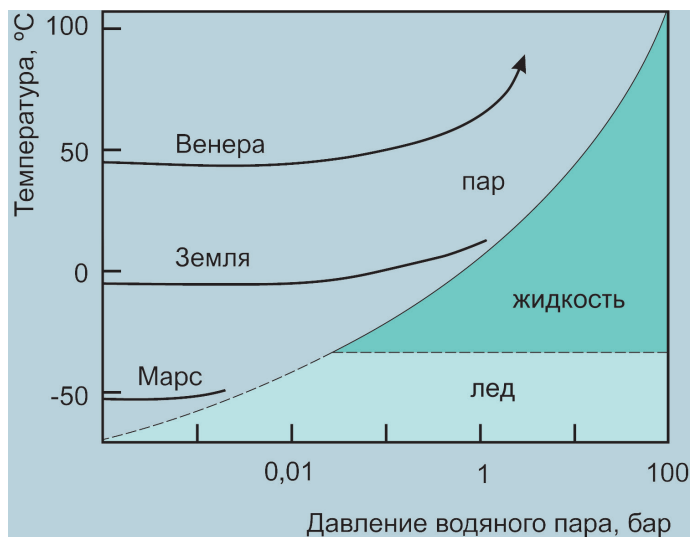


Диаграмма агрегатных состояний воды на Венере, Земле и Марсе. По данным ИКИ РАН.

являться вода в жидком состоянии? – Ответ в том, что, как мы уже говорили, давление на планете очень низкое, ввиду чего вода на Марсе может переходить из твердого состояния сразу в газообразное.

Вся имеющаяся на Марсе вода замерзла – в отличие, например, от воды на Венере – где океаны давно испарились и вся вода находится в атмосфере в виде водяного пара. Венере и Марс "потеряли" почти всю свою воду. Но еще в 1970-х гг. на снимках с космических аппаратов были обнаружены русла высохших рек и озер. Эти находки и первые модели палеоклимата привели к концепции "раннего теплого Марса", часть поверхности которого занимал океан. Исследования подтверждают, что океан воды на Марсе мог достигать глубины 500 м. Даже при условии, что атмосфера Марса улетучилась, вся эта вода не могла исчезнуть, так как большая ее часть должна была проникнуть под поверхность. Некоторые оценки показывают, что, если сейчас растопить все подповерхностные запасы марсианского льда, то планета покроется слоем воды толщиной не менее 30 м.

и SPICAM исследовал марсианские полярные шапки, которые, как оказалось, многослойны: водяной лед, составляющий их основу, покрыт слоем замерзшей двуокиси углерода – вещества, известного нам как "сухой лед" (Земля и Вселенная, 2005, № 1).

Позднее, благодаря снимкам высокого разрешения, полученным с помощью американской АМС "Марсианский разведывательный орбитер" ("Mars Reconnaissance Orbiter"), запущенной 12 августа 2005 г., на склонах марсианских холмов удалось обнаружить возникающие в летнее время короткоживущие потоки жидкой, возможно, соленой воды – что стало настоящей сенсацией (Земля и Вселенная, 2006, № 4, с. 88; 2010, № 2, с. 29–31; 2015, № 1, с. 45–46).

Для более детального анализа влажных районов, изу-

чения геологии и климата на планете 16 августа 2012 г. на Марс был доставлен американский марсоход "Кьюриосити" ("Curiosity"; Земля и Вселенная, 2012, № 3, с. 110–112; 2013, № 1, с. 102–105; 2015, № 81, с. 50–51), на борту которого также установлен разработанный в ИКИ РАН прибор ДАН (Dynamic Albedo of Neutrons – динамическое альбедро нейтронов). В отличие от своего предшественника, ДАН – активный нейтронный прибор, состоящий из двух частей: нейтронного генератора и детектора. Измерения водорода в грунте он проводит по трассе движения марсохода, "обстреливая" поверхность нейтронами самостоятельно.

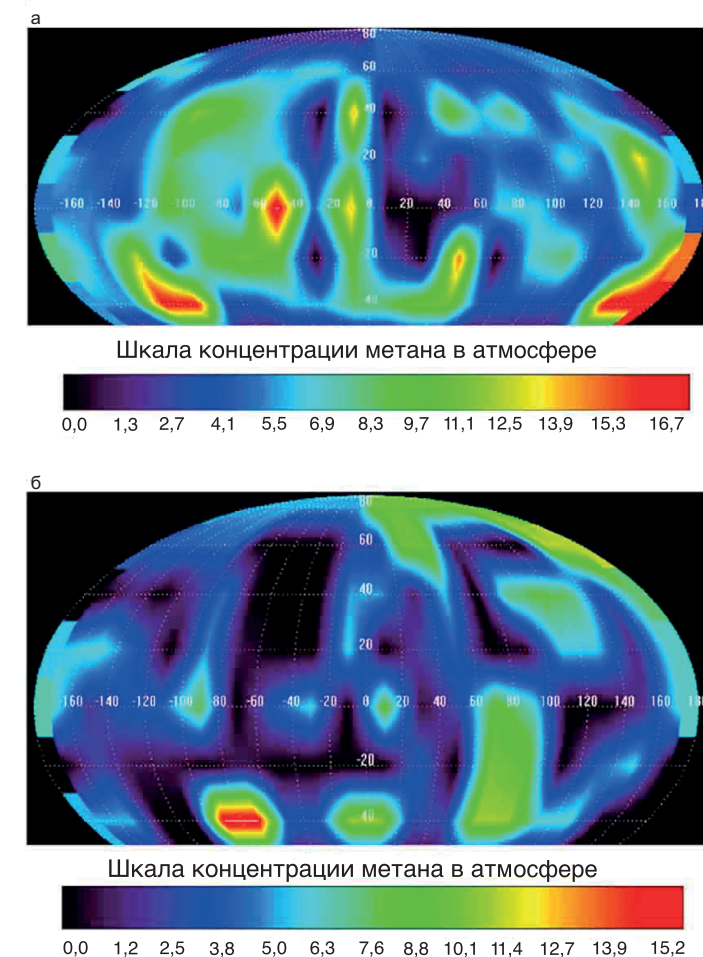
Однако, возвращаясь к теме существования на Марсе жидкой воды, хочется задать характерный вопрос: если на планете так холодно, то как же там могла по-

Карта Марса с указанием распределения метана в марсианской атмосфере (PFS-MEX, *Geminale et al., 2011*): а – зима в Северном полушарии; б – лето в Северном полушарии. По данным ESA.

На диаграмме видно, как "повезло" Земле: наша планета прошла (пока!) между "сциллой" испарения воды и "харибдой" ее вымораживания, сохранив и громадные океаны, и могучие ледники, и водяной пар в атмосфере. Но отсюда должно быть понятно, как хрупок этот баланс и как опасен самораскачивающийся парниковый эффект, в общем-то, лишивший Землю похожей на нее "планеты-сестры".

Однако, возвращаясь назад, отметим, что самое интересное открытие было сделано в 2004 г., когда аппарат "Марс Экспресс" обнаружил в атмосфере Марса метан (CH_4) – газ, который принято считать признаком биологической активности, так как он выделяется, например, при процессах брожения, гниения. Открытие было сделано на границе чувствительности прибора Фурье-спектрометра PFS, ввиду чего не было признано достоверно точным (Земля и Вселенная, 2005, № 1).

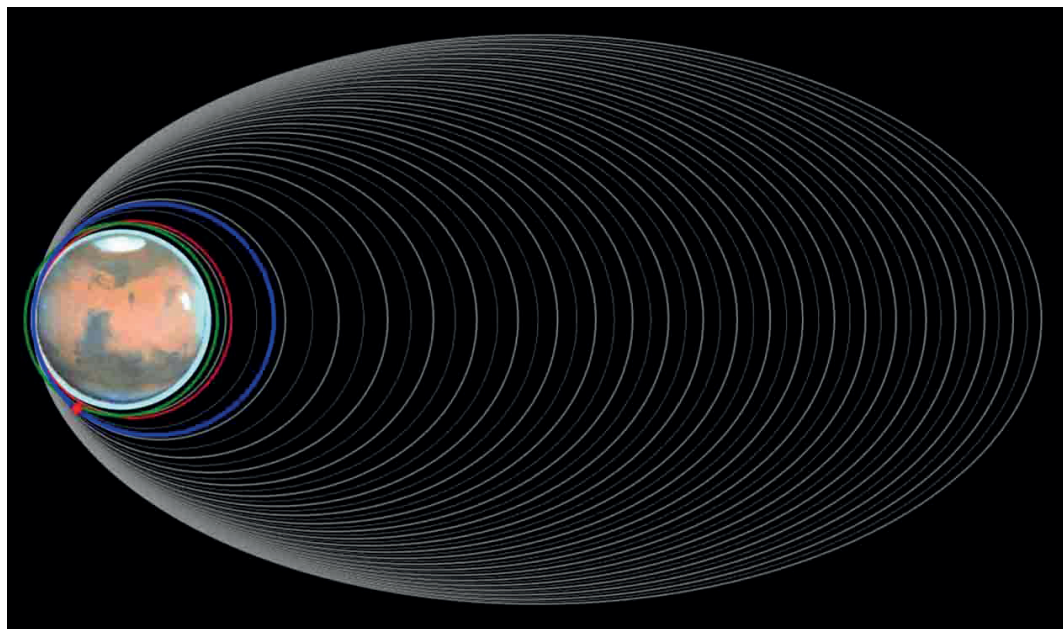
Первая гипотеза предполагала, что обнаруженный метан – это остатки той возможной биологической активности, которая могла быть на планете в прошлом,



но наблюдения, выполненные с помощью АМС "Марс Экспресс" и с Земли, показали существенные колебания концентрации метана в атмосфере. Более того, метан достаточно быстро разлагается под действием ультрафиолетового излучения Солнца, и те запасы этого газа, которые мы сейчас наблюдаем на Марсе, должны были бы разложиться примерно за 300–500 лет. Однако мы видим, что концентрация газа варьируется

в разных районах, ввиду чего возник вопрос о поиске источников его воспроизводства. Оценки показывают, что в год в атмосферу Марса выбрасывается несколько тысяч тонн метана. Гипотезы, помимо версии о биологической активности, все еще существуют, но все они гораздо менее вероятны.

Основной аргумент против гипотезы о биологической активности на Марсе – данные прошлых миссий:



Модуль TGO «тормозится» об разреженную атмосферу Марса (показаны витки AMC). Рисунок ESA.

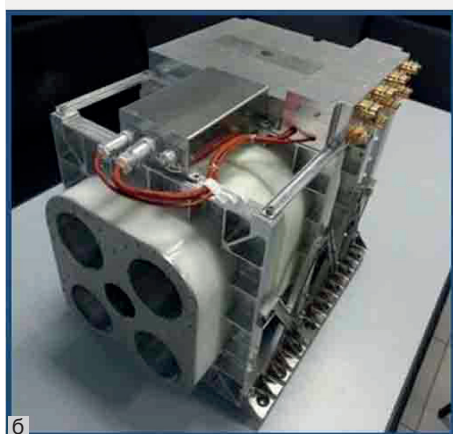
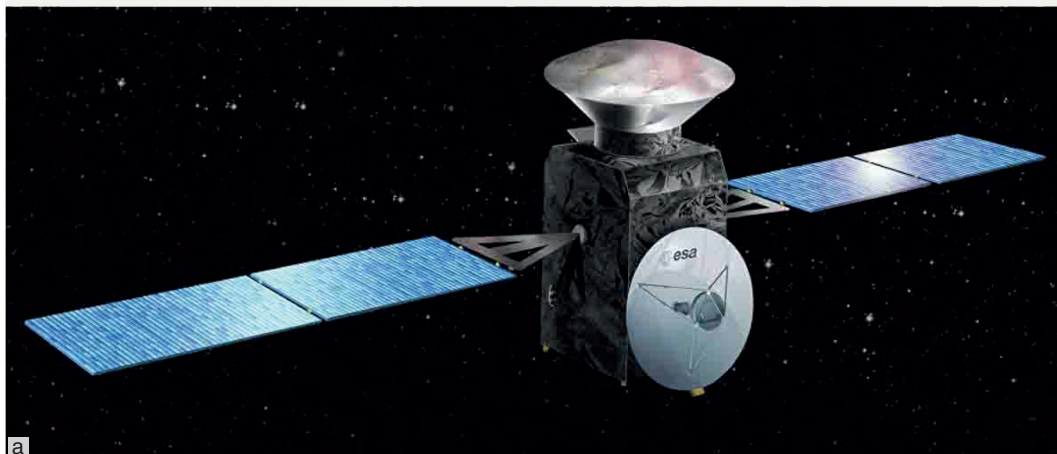
в частности, результаты экспериментов посадочных аппаратов NASA "Викинг-1" и "Викинг-2" (1975–1982 гг.), с помощью которых так и не удалось обнаружить на Марсе какую-нибудь органику. Но тут следует отметить, что измерения приборов "Викингов" были первой попыткой поиска следов жизни на другой планете... Приборы тогда были несовершенны, и ученые до сих пор спорят, как интерпретировать многие результаты этой "пионерской" экспедиции на Марс (Земля и Вселенная, 1976, № 3; 1977, № 3).

Лишь в 2015 г. с помощью приборов марсохода "Кьюриосити" были обнаружены

разрушенные следы органических соединений, доказывающие, что, помимо самого метана, косвенные свидетельства возможной жизни на Марсе все же есть. Учитывая тот факт, что космические лучи, радиация и другие факторы жестко "стерилизуют" поверхность планеты, то любую гипотетическую биологическую активность следует искать под слоем грунта.

Решение этого вопроса – одна из основных задач совместного проекта госкорпорации "Роскосмос" и Европейского космического агентства "ЭкзоМарс", ставшего следующим шагом в этом направлении. Хочется вспомнить добрым

словом руководителей Российского и Европейского космических агентств Владимира Александровича Поповкина (1957–2014) и Жана-Жака Дардена: быстро, без обычной в таких случаях политической и бюрократической волокиты решивших вопрос об участии России в этой интереснейшей программе. Это позволило российским специалистам, опираясь на обширный опыт использования отечественных приборов в европейских и американских миссиях, всего за несколько лет подготовить сложные современные приборы для исследования атмосферы и поверхности Марса.



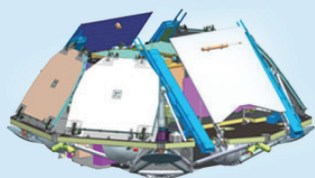
Проект "ЭкзоМарс-2016": а – орбитальный модуль TGO, б – прибор FRENDA, в – прибор ACS. Рисунки ESA.

Проект состоит из двух этапов. 14 марта 2016 г. с космодрома Байконур произведен успешный запуск с помощью РН "Протон-М" с разгонным блоком "Бриз-М" АМС "ЭкзоМарс" – первой части миссии (Земля и Вселенная, 2016, № 3). После четырех включений двигателей четвертой ступени прои-

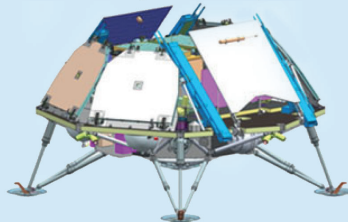
зошло успешное отделение космического аппарата, траектория которого даже не потребовала корректировки благодаря безукоризненной работе разгонного блока. В октябре 2016 г. станция успешно достигла Марса. К сожалению, при посадке разбился демонстрационный десантный

модуль "Скиапарелли", но орбитальный аппарат TGO (Trace Gas Orbiter) успешно вышел на высокоэллиптическую марсианскую орбиту. Вплоть до апреля 2018 г. методом аэробрейкинга, то есть "чирканьем" аппарата о край атмосферы, проводилась коррекция его орбиты до круговой, а в конце

Транспортная конфигурация
космического аппарата при
полете к Марсу



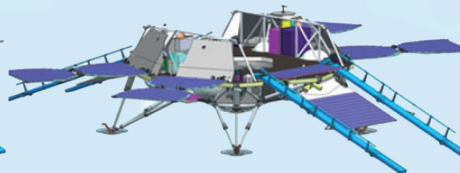
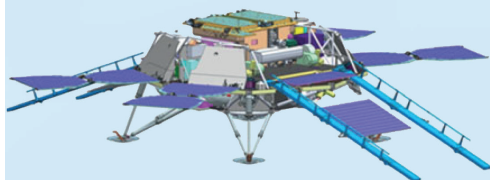
Конфигурация космического
аппарата после посадки на
поверхность Марса



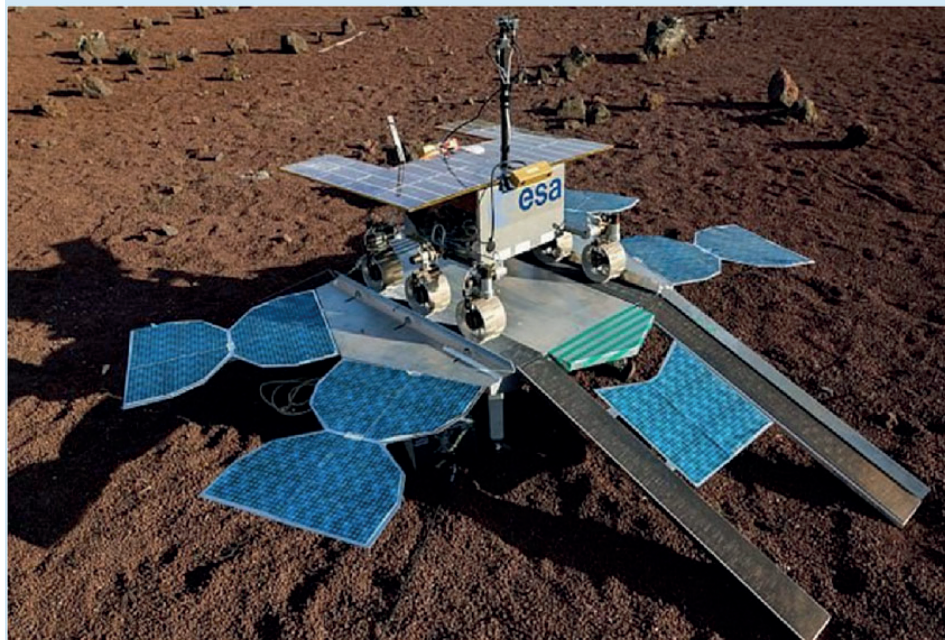
Марсоход



Развертывание панелей
солнечных батарей и трапа
для схода марсохода



Посадочная платформа



АМС "ЭкзоМарс-2020": схема последовательных операций по развертыванию посадочной платформы с марсоходом на борту на поверхности Марса. Внизу – марсоход на посадочной платформе. Рисунки ESA.

апреля 2018 г. TGO приступил к выполнению научной программы.

Европейский орбитальный модуль TGO предназначен для регистрации малых составляющих марсианской атмосферы (в том числе метана), картирования распределения воды в верхнем слое грунта с высоким пространственным разрешением, а также для стереосъемки и подготовки к посадке марсохода во второй части миссии.

Изучать Марс на его борту отправили два российских прибора: FRENД (Fine Resolution Epithermal Neutron Detector – детектор эпитепловых нейтронов высокого разрешения) с болгарским дозиметрическим модулем "Люлин-МО" и комплекс спектрометров ACS (Atmospheric Chemistry Suite – комплекс для изучения химии атмосферы). FRENД также работает по принципу своих предшественников, однако большая точность достигается за счет того, что нейтронные измерения проводятся в узком поле зрения, около 10° , что позволяет измерить распределение воды под поверхностью Марса с разрешением около 40 км, что примерно в 10 раз точнее измерений, проводимых с помощью прибора ХЕНД на АМС "Марс Одиссей". Комплекс ACS разработан для решения главной научной задачи миссии – исследования состава марсианской атмосферы с орбиты

искусственного спутника. Комплекс спектрометров, работающих в разных отрезках ИК-спектра, позволит обнаружить малые составляющие марсианской атмосферы, аэрозоли; наблюдать свечения; проводить мониторинг трехмерных полей температуры и давления.

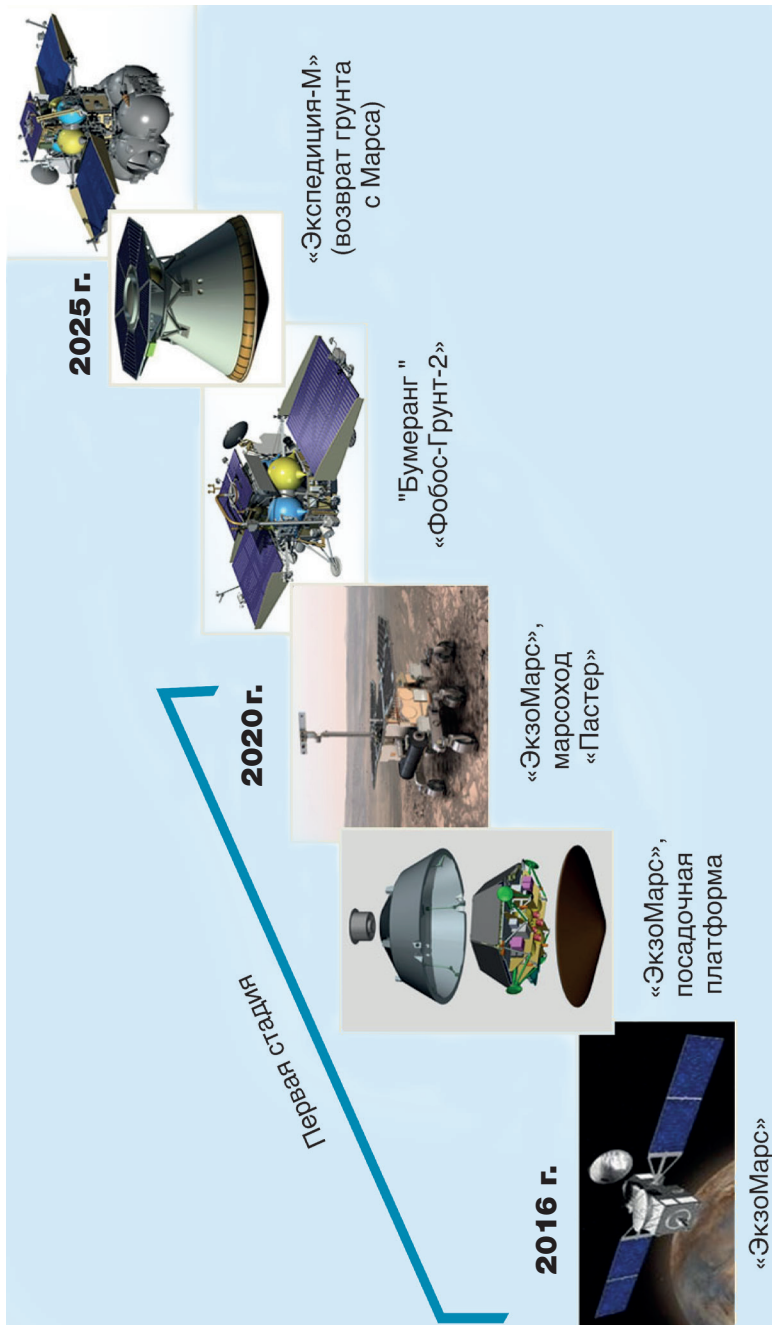
Запуск второй части программы "ЭкзоМарс" намечен на 2020 г. Миссия будет включать в себя российскую посадочную платформу с научным комплексом на борту и европейский марсоход "Пастер", на котором также будут установлены научные приборы, многие из которых разработаны в ИКИ РАН. Для этой части проекта важно учитывать тот нюанс, что для посадки аппарата в разреженной атмосфере Марса парашют для торможения должен быть гораздо больше, а место посадки – как можно ниже, чтобы "по полной" использовать атмосферное торможение. Посадочные места также выбираются не случайно – ученые стараются найти районы, которые удовлетворяли бы обоим признакам гипотетической биологической активности: то есть одновременно сочетали бы наличие и подповерхностной воды, и метана.

Одним из таких мест является плато Оксия, которое выбрано для посадки миссии "ЭкзоМарс-2020". После того, как марсоход съедет на поверхность пла-

неты, посадочный модуль начнет свою собственную научную программу по исследованию окружающей среды как долгоживущая автономная станция, основой которой является российский научный комплекс. Среди ее задач – долговременный мониторинг климата, состава атмосферы и ионизирующего излучения; сейсмические эксперименты; изучение сезонных изменений подповерхностной воды, а также изучение взаимодействия атмосферы и поверхности.

Марсоход будет способен преодолевать дистанции в несколько километров в поисках "следов" прошлой или настоящей биологической активности. Отличительная его особенность – бурильная установка, позволяющая брать пробы грунта с глубины до 2 м – оттуда, куда не проникает ионизирующее излучение. Пробы на месте будут исследоваться с помощью аналитической лаборатории марсохода. Аппарат TGO миссии 2016 г. в это время будет использоваться в качестве ретранслятора.

Дальнейшие шаги в этом направлении предполагают запуск аппаратов, которые обеспечат доставку грунта с Фобоса – спутника Марса. Название "Бумеранг" проекту дано неспроста: миссия – "реинкарнация" неудавшегося в 2011 г. проекта "Фобос-Грунт". Его задачи: перелет к Марсу, посадка на Фобос, забор грунта



Этапы проведения российской марсианской программы в период с 2016 по 2025 гг. Рисунок ИКИ РАН.

с Фобоса и возврат его на Землю. Проект находится в стадии разработки, его запуск планируется на 2026 г.

Следующий этап – возврат грунта уже непосредственно с Марса. Такая операция будет производиться в два этапа: посадочный

модуль спустится на поверхность планеты, а затем с грунтом возвратится на орбиту и "перегрузит" его на возвратный аппарат, который отправится к Земле.

Мы очень рассчитываем на успех этих автоматических миссий. С пилотируемыми

полетами все гораздо сложнее: роботы с каждым годом становятся все более развитыми и интеллектуальными, а вот человеку на Марсе пока делать нечего. "Теплое место" для нашего визита на Марс аппараты вполне могут "подготовить" сами.

Информация

"Хаябуса-2" сфотографировала астероид Рюгу

С помощью японской АМС "Хаябуса-2" 26 февраля 2018 г. с использованием навигационной камеры ONC-T (Optical Navigation Camera) с расстояния 1,3 млн км сделан первый снимок цели ее путешествия – астероида Рюгу

(162173)1999 JU3. Запущенная в 2014 г., станция предназначена для доставки образцов грунта с этого астероида класса С, имеющего вытянутую орбиту и пересекающего не только орбиту Земли, но и Марса (Земля и Вселенная, 2015, № 2, с. 15). Считается, что астероиды класса С наиболее распространены в Солнечной системе и поэтому они представляют интерес для исследователей.

Сближение АМС "Хаябуса-2" с Рюгу намечено на июль 2018 г. С этого момента начнется активная фаза исследований, которая продлится полтора года. В течение этого време-

ни будет спущен на астероид модуль MASCOT, на котором установлены спектрометр, магнитометр, радиометр и камера, а также заряд SCI (Small Carry-on Impactor), состоящий из медного снаряда и заряда взрывчатки для формирования ударного ядра. Предполагается, что при подлете к Рюгу аппарат "выстрелит" этим зарядом по поверхности астероида. На дне образовавшегося кратера ученые планируют обнаружить другие образцы породы.

*Пресс-релиз JAXA,
1 марта 2018 г.*

Найти опасный астероид, пока он не нашел нас

Б.М. ШУСТОВ,
член-корреспондент РАН

С.А. НАРОЕНКОВ,
кандидат физико-математических наук
Институт астрономии РАН

Представляем читателю статью об астероидно-кометной опасности (АКО). Эта тема популярна в СМИ, которые используют ее для привлечения внимания, часто преувеличивая опасность и некорректно представляя факты. На самом деле проблема АКО в последние годы находится в центре внимания как фундаментальной, так и прикладной науки, а ее самая актуальная составляющая – задача обнаружения опасных небесных тел (ОНТ) – пожалуй, одна из главных практических



задач, стоящих перед современной астрономией. В представленной статье авторы, работающие в этом

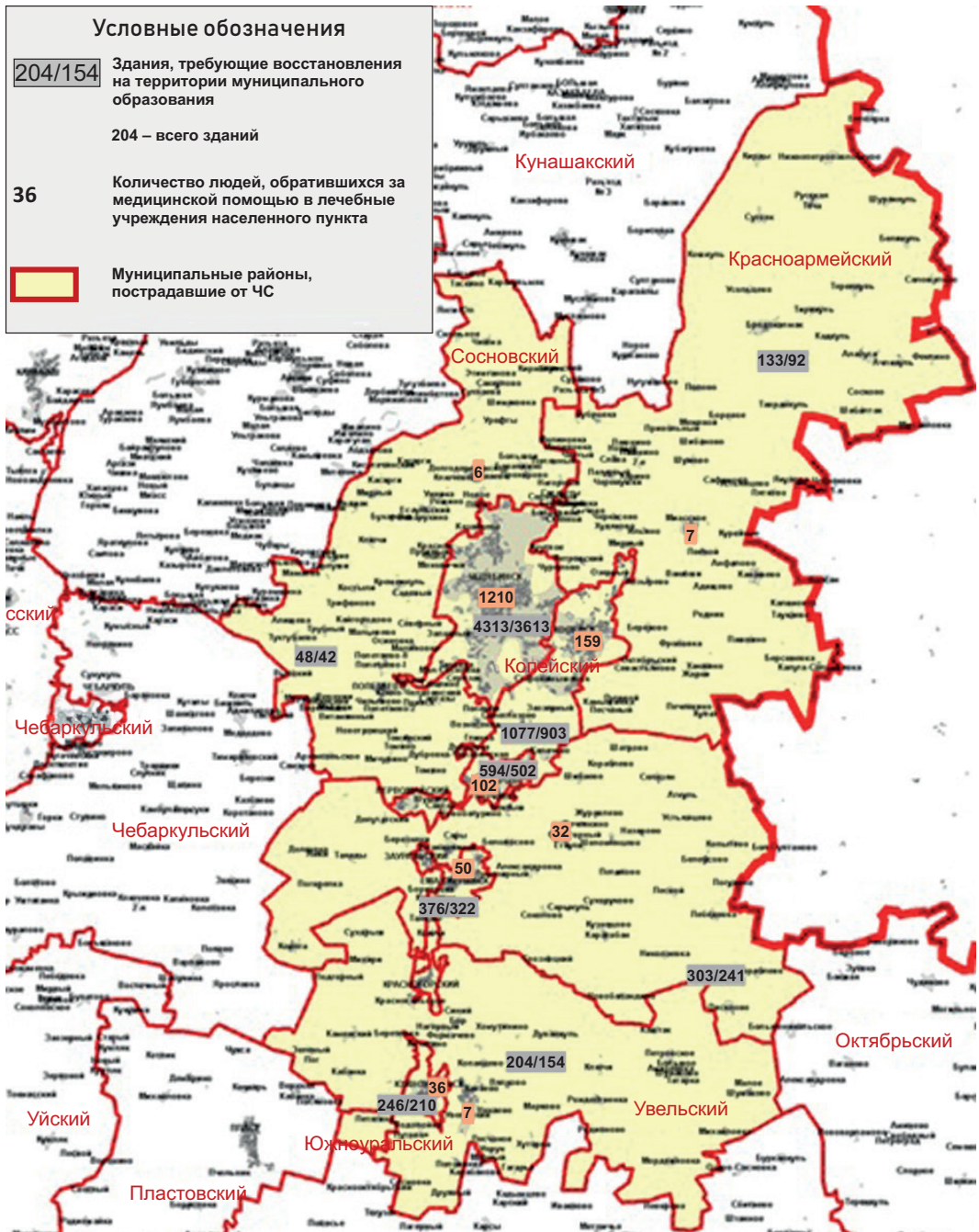
направлении, рассматривают проблему поиска ОНТ и методы ее решения, опираясь на свой и мировой опыт.

ЧТО ТАКОЕ АСТЕРОИДНО-КОМЕТАЯ ОПАСНОСТЬ

Астероидно-кометная опасность – это угроза столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы

(астероидами и кометами) с причинением серьезного ущерба населению планеты, вплоть до уничтожения цивилизации. Это – весьма серьезная научная проблема, да и не только научная.

На рубеже XX и XXI вв. произошла существенная переоценка ее значимости (Земля и Вселенная, 2003, № 2). Долгое время проблема АКО была предметом изучения для узкого круга специалис-



Карта разрушений остекления окон и дверей на территории Челябинской области. По материалам МЧС.

тов, но теперь она осознается гораздо более широко как комплексная глобальная проблема, стоящая перед человечеством. Причина такого драматического изменения состоит в том, что накопилась некоторая критическая масса фундаментальных знаний о населении малых тел в Солнечной системе, об их динамической и физической эволюции (в частности, о механизмах пополнения популяции опасных тел), о частоте столкновений малых тел с планетами (в особенности с Землей), о возможных последствиях их падений. В России ученые и специалисты уделяют этой проблеме все большее внимание. Сравнительно полное описание проблемы АКО можно найти в монографии "Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра" (ред. Б.М. Шустов и Л.В. Рыхлова, Физматлит, 2010 г.; Земля и Вселенная, 2011, № 3) и в написанной так же группой авторов под руководством Б.М. Шустова монографии "Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия" (ред. В.А. Пучков, ВНИИ ГОЧС, 2015 г.).

Наиболее ярким недавним проявлением реальности проблемы АКО стало Челябинское событие 15 февраля 2013 г., когда в атмосферу Земли над территорией Челябинской области вошло космическое тело размером около 17 м (Земля и Вселенная, 2014, № 5). Этот "вход"

наблюдался как явление "болида", оно сопровождалось сильным взрывом, воздушной ударной волной, световым и электромагнитным излучением, сейсмическим и акустическим возмущением. Общий ущерб был значителен (до 1 млрд рублей); за медицинской помощью обратились более 1600 человек. Площадь поражения была значительной.

Это было событие, изменившее отношение к проблеме АКО со стороны многих людей в России и за рубежом, в том числе и со стороны государств. Изменилось представление о том, какие тела считать опасными. Перед учеными и специалистами встала задача создания эффективной системы предупреждения о столкновениях с ОНТ размером от 10 м и более и разработки методов противодействия угрозе.

В этой работе авторы представляют современное состояние проблемы обнаружения ОНТ и предлагают методы ее решения, опираясь на свой (Института астрономии РАН) и мировой опыт.

КАКИЕ ТЕЛА СЧИТАТЬ ОПАСНЫМИ?

Задача обнаружения ОНТ – первоочередная и, пожалуй, одна из главных практических задач, стоящих перед современной астрономией. В представленной ниже таблице в общей форме даны оценки частоты столкновений малых тел раз-

личного размера с Землей и их последствий. На первый взгляд, наиболее опасны тела большого размера, но такие тела падают на Землю очень редко (реже, чем раз в несколько миллионов лет). Для человеческого вида (*Homo sapiens*), существующего лишь около 100 тыс. лет, такие исключительные события представляют в основном «академический» интерес. Наибольший же практический интерес представляют более частые падения тел, в диапазоне размеров от 10 до 500 м. Это – уже достаточно крупные тела, которые могут причинить значительный ущерб, и их падения на "шкале существования человечества" – не редкость. Они находятся в зоне основного интереса в отношении противодействия угрозе для тех, кто занимается проблемой АКО.

Под опасными небесными телами мы обычно понимаем не только те довольно крупные тела, которые "гарантированно" столкнутся с Землей. Если вероятность столкновения с небесным телом достаточно велика, то его также относят к ОНТ. Существуют общепринятые количественные критерии определения некоторых классов и подклассов ОНТ. Так, под объектами, сближающимися с Землей (ОСЗ, в англоязычной литературе NEO – Near Earth Objects), понимают астероиды и кометы с орбитами, для которых расстояние в перигелии $q < 1,3$ а.е. Для астероидов,

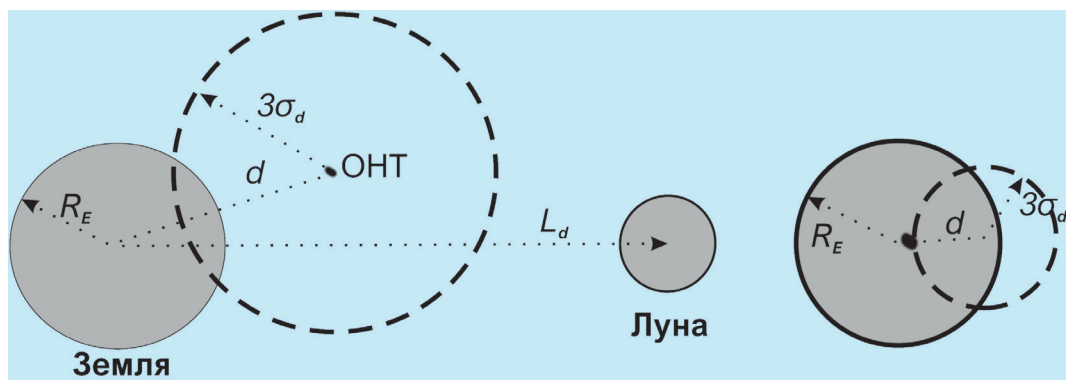
**Средняя частота и результаты столкновений малых тел
различных размеров с Землей**

Космический объект	Размер	Характерный промежуток времени между столкновениями	Размер кратера, км	Результат столкновения с Землей (пример)
Пылинка, микрометеороид	менее 0,1 см	практически непрерывно		Сгорает в атмосфере (метеор) или "выпадает" на планету
Метеороид, астероид, комета	0,1 см – 1 м	практически ежедневно		Сгорает в атмосфере (болид)
	1 – 30 м	несколько месяцев		Остатки долетают до Земли (метеорит), либо разрушаются и полностью сгорают в атмосфере
	более 30 м	около 300 лет	нет	Воздушный взрыв (Тунгусское событие)
			более 0,5	Поверхностный взрыв (Аризонский кратер)
				Локальная катастрофа
Астероид или комета	более 100 м	несколько тысяч лет	более 2	Наземный или подводный взрыв
				Региональная катастрофа
	более 1 км	более 1 млн лет	более 20	Глобальная катастрофа
	10 км	100 млн лет	200	Конец цивилизации

сближающихся с Землей, используют аббревиатуру АСЗ (в англоязычной литературе – NEA), для комет – КСЗ. В классе ОСЗ выделяют потенциально опасные объекты (ПОО, в англоязычной литературе PHO – Potentially Hazardous Objects, в том числе ПОА – потенциально опасные астероиды), под которыми понимают тела, чьи орбиты сближаются с орбитой Земли до минимального расстояния, не превышающего 0,05 а.е., то есть до 7,5 млн км. Основанием для

того, чтобы считать такие тела опасными, является то обстоятельство, что в таких пределах можно ожидать изменения расстояний между орбитами малого тела и Земли в обозримом будущем (100–200 лет) под влиянием гравитационных возмущений от планет. Кроме того, 0,05 а.е. – характерный масштаб области неопределенности орбиты малого тела (при прогнозировании примерно на сто лет вперед) вследствие неточного знания параметров движения тела в

настоящую эпоху. К этому (динамическому) определению ПОО в мировой литературе добавляют требование, чтобы абсолютная звездная величина астероида H тела не превосходила 22,0 (см., например: <http://neo.jpl.nasa.gov/neo/groups.html>). Заметим, что H – это некоторая искусственная величина, поскольку она определяется как звездная величина астероида, наблюдаемого с расстояния 1 а.е. от Земли и от Солнца при нулевом фазовом угле (нет эффекта фазы),



Классификация сближений опасных небесных тел с Землей. Слева – угрожающее, справа – столкновительное сближение. R_E – радиус Земли, d – расстояние от ОНТ до центра Земли, L_d – диаметр орбиты Луны, $3\sigma_d$ – размер зоны рассеяния орбит.

но в реальной ситуации астероид на таких расстояниях не может наблюдаться при нулевом фазовом угле! Для некоторой (средней для астероидов) величины альбедо, равной 0,15 размера сферического тела, имеющего $H = 22,0$, оценивается примерно в 140 м.

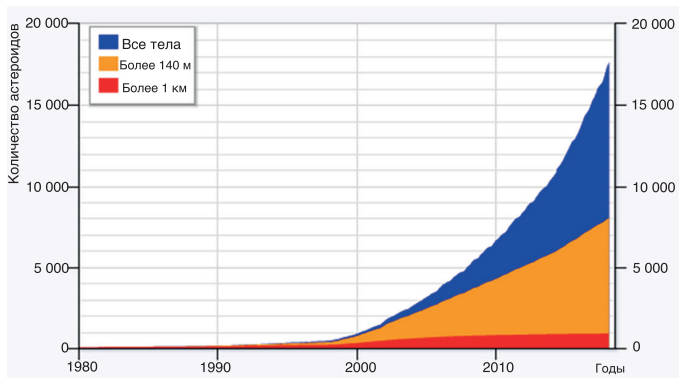
Мы полагаем, что в современных условиях и этой классификации уже не достаточно. Пора изменить нижнюю границу в определении ПОО и рассматривать в качестве ПОО тела размером от 50 м (размер Тунгусского тела) или даже от 10 м (практический нижний предел, "подтвержденный" Челябинским событием). Кроме уточнения нижней границы размеров опасного тела авторы статьи ввели дополнительные определения динамических (орбитальных) классов ОНТ. Предлагается называть ОНТ (и, соответственно, их

орбиты) угрожающими, если, с одной стороны, оценка минимального расстояния d от ОНТ до центра Земли не превышает радиуса L_d лунной орбиты, то есть $d < L_d$; а, с другой стороны, размер (радиус) $3\sigma_d$ зоны рассеяния орбит в плоскости цели (плоскости, проходящей через центр Земли и перпендикулярной направлению орбиты опасного тела) превышает расстояние до поверхности Земли $d - 3\sigma_d < R_E$, где (R_E – радиус Земли), и столкновительными, если выполняются условия: $d < R_E$ и $3\sigma_d < R_E$. Это, последнее, определение не вполне строго соответствует неизбежности столкновения, так как вероятность столкновения для такого тела (орбиты) несколько меньше 50%. Но, конечно, все мероприятия по противодействию будут такими же, как и в случае 100% вероятности столкновения.

ПРОБЛЕМА ПОИСКА ОНТ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ СВОЙСТВ

Первоочередной задачей является решение проблемы обнаружения ОНТ. В современной трактовке она рассматривается как задача оперативного и массового (то есть не ниже некоторого порога полноты, обычно 90%) выявления опасных тел. Регулярные наблюдения (мониторинг, в англоязычной литературе также используют термин follow up) как новых, так и найденных ранее опасных объектов должны обеспечить уточнение их орбит и максимально полное исследование физических свойств. Это важно для надежной оценки вероятности и последствий столкновения. Как мы увидим ниже, несмотря на быстрый прогресс в обнаружении ОНТ, проблема остается очень далекой от решения.

Диаграмма роста числа обнаруженных околоземных астероидов за период с 1980 по 2018 гг. Красным показан рост числа крупных АСЗ размером более 1 км, синим – общее число АСЗ. Рисунок с сайта: <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>.



До середины 1990-х гг. обнаружение опасных тел осуществлялось либо в рамках отдельных астрономических программ исследований астероидов и комет, либо случайно. Прогресс в открытии новых ОНТ принято иллюстрировать хорошо известной и постоянно обновляющейся диаграммой с сайта: <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>. На 5 февраля 2018 г. насчитывалось 17 652 АСЗ, из них потенциально опасных астероидов – 1886. Комет, сближающихся с Землей, – 107, но ни одна из них не является потенциально опасной. Из этих данных следует, что кометы составляют лишь малую часть ОНТ и в дальнейшем при рассмотрении общей ситуации по проблеме АКО можно ограничиться именно астероидами. Из этих данных и из результатов моделирования "населения" малых тел Солнечной системы можно сделать еще несколько выводов:

- темп обнаружения АСЗ стремительно возрос, начиная с 1998 г. Это связано с началом реализации специальной программы "Космическая стража" (Spaceguard Survey), которая получила финансовую поддержку со

стороны Конгресса США. NASA поручалось приложить усилия к тому, чтобы в течение 10 лет открыть не менее 90% крупных (более 1 км) АСЗ. К концу 2009 г. задача была выполнена. Это – хорошая иллюстрация эффективности государственной поддержки при решении таких важных задач:

- хотя количество известных крупных АСЗ изменяется мало и практически все они уже обнаружены, но общее количество обнаруженных АСЗ продолжает быстро расти;

- доля обнаруженных АСЗ к общему числу АСЗ этого размера очень существенно зависит от размера АСЗ: для тел крупнее 1 км она близка к 95%, для пятидесятиметровых (Тунгусское тело) – примерно 1%, а для объектов меньшего размера (например, Челябинское тело) доля обнаруженных АСЗ крайне мала.

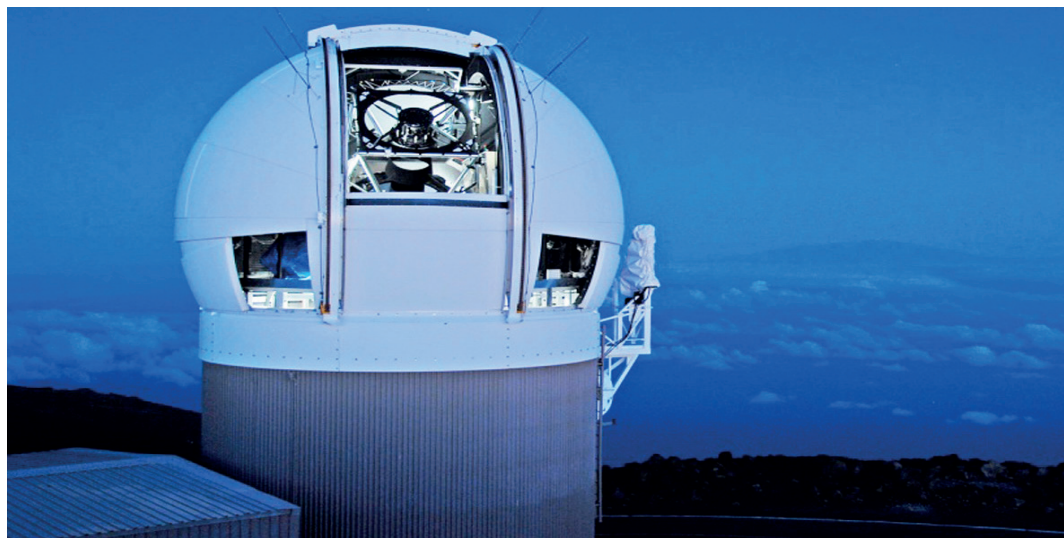
ПОЧЕМУ ЖЕ МЫ ТАК СЛАБО ИНФОРМИРОВАННЫ?

Главная проблема – в инструментах для наблюдений. Там, где строитель-

ству специализированных инструментов уделяется серьезное внимание, там и достигнут наибольший прогресс в поиске ОНТ. По данным финансируемого NASA Центра малых планет при Международном астрономическом союзе (<http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/mpc.html>), большинство ОНТ (более 98%) обнаружены с помощью наблюдательных средств США. Особо показателен рост "вклада" телескопа PS1 (Pan-STARRS), с помощью которого осуществляется половина всех открытий. Доля участия российских обсерваторий в обнаружении АСЗ пока что очень мала (менее 0,1%). Далее мы расскажем, что же делается в нашей стране для преодоления отставания.

КАКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ НУЖНЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОНТ?

В мире построено уже довольно много крупных астрономических телескопов, но они, к сожалению, не годятся для решения задач массового



Американский телескоп Pan-STARRS-1 (диаметром зеркала 1,8 м) для поиска опасных небесных тел в башне. Телескоп расположен на Гавайях. Фото обсерватории Pan-STARRS.

поиска ОНТ из-за малого поля зрения. Для создания современной системы обнаружения необходимо создавать специальные инструменты.

Современные представления о решении задачи поиска подразумевают наличие двух направлений:

- заблаговременное обнаружение крупных ОНТ (размером более 50 м) со временем упреждения в несколько десятков суток, достаточным для обеспечения возможности активного противодействия;

- обнаружения ОНТ в околоземном космическом пространстве (ОКП), то есть в зоне радиусом 1 млн км от Земли. Основная цель – выявить ОНТ размером более 10 м в ОКП со временем упреждения от 4 до 20 ч, достаточным для "выдачи" предупреждения.

Перечислим главные требования к системам, предна-

значенным для обнаружения крупных ОНТ (более 50 м) на больших расстояниях. Оптимальные параметры таких систем вполне определены:

- поле зрения инструмента должно быть не менее нескольких (желательно десяти) квадратных градусов;

- проникающая способность не хуже 22^m , при экспозициях – не более нескольких десятков секунд. Это означает, что апертура телескопа должна быть не менее 1–2 м; для космических инфракрасных телескопов она может быть меньше, так как астероиды большую часть поглощаемой ими солнечной энергии "переизлучают" в ИК-диапазоне (5–15 мкм);

- время обзора всей доступной области небесной сферы – несколько суток;

- большое количество ясных ночей с хорошим каче-

ством изображения (для наземных телескопов);

- необходимо очень мощное компьютерное оборудование и математическое обеспечение для получения оперативной информации о новых объектах в течение ночи и окончательной обработки до начала следующей ночи.

В качестве примера современных крупных специализированных наземных инструментов, пригодных для обнаружения опасных объектов, приведем телескопы известного проекта американской системы из 4 телескопов "Pan-STARRS" (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System – система телескопов панорамного обзора и быстрого реагирования). Каждый из телескопов (пока работают два) имеет апертуру 1,8 м и большое поле

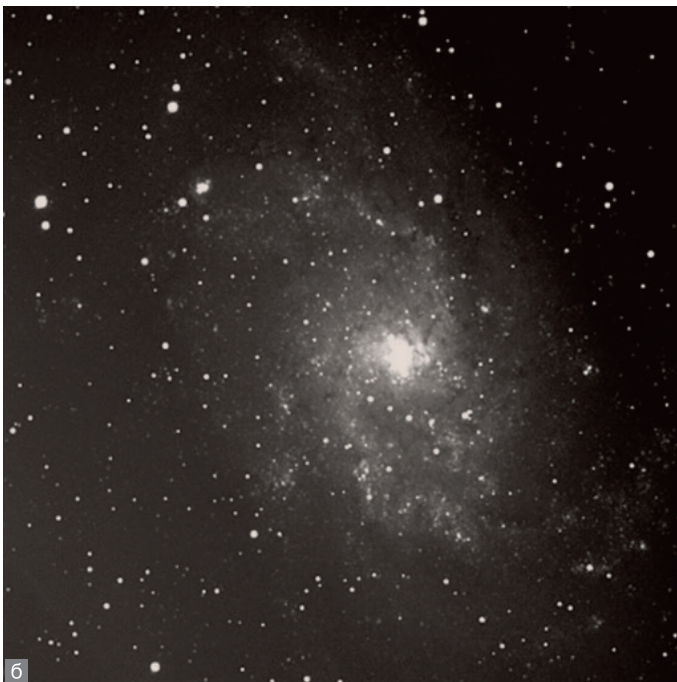
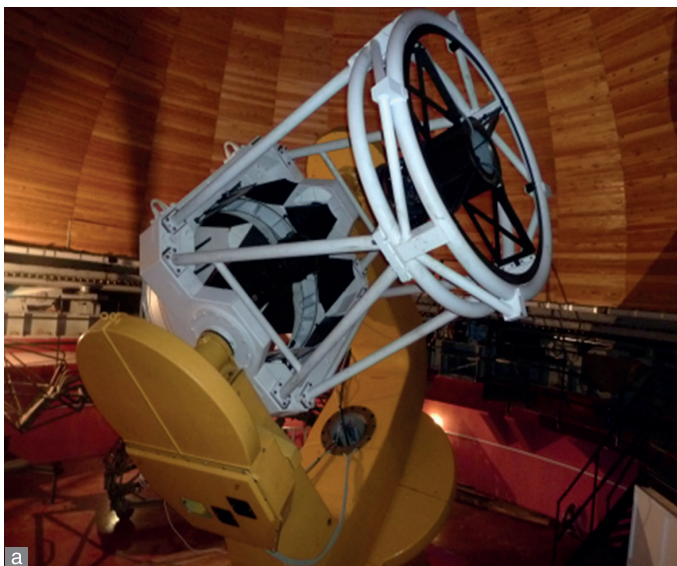
Телескоп АЗТ-33ВМ Института солнечно-земной физики СО РАН, расположенный на обсерватории "Монды" ИСЗФ СО РАН (а) и одно из первых, полученных с помощью телескопа АЗТ-33ВМ, изображений спиральной галактики М33 (NGC 598) в Треугольнике (б). Фото ИСЗФ СО РАН.

зрения (3°), ПЗС-приемник имеет огромные размеры – 1,4 млрд пикселей. Проникающая сила телескопа при экспозиции 60 секунд составляет 24^m . В режиме обзорного поиска эти телескопы будут способны "покрыть" всю доступную площадь неба трижды в течение месяца.

В России в Институте солнечно-земной физики СО РАН для обнаружения АСЗ "на дальних подступах" начал работу телескоп АЗТ-33ВМ, созданный на предприятии ЛОМО. Его параметры лишь немного уступают параметрам телескопов "Pan-STARRS". Имея поле зрения около 3° и диаметр главного зеркала 1,6 м, этот телескоп будет способен "увидеть" объекты 24-й видимой звездной величины за экспозицию в 2 мин. В 2016 г. начата опытная эксплуатация телескопа, но он пока не полностью оснащен приемниками излучения. Это важная проблема, которую нужно решать незамедлительно.

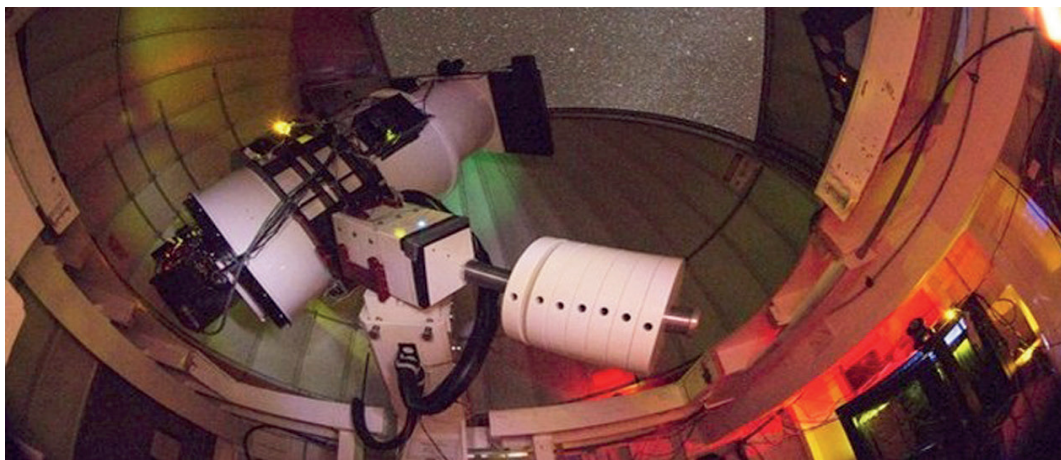
Теперь перечислим главные требования к телескопам для обнаружения ОНТ размером от 10 м в ОКП:

- поле зрения инструмента должно быть не менее десяти квадратных градусов;



- проникающая способность не хуже 17^m при экспозициях не более 10 с (апертура телескопа должна быть не менее 0,3–0,5 м, в зависимости от режима наблюдений – сканирование или прямое наведение);

- рабочий диапазон длин волн – видимый, хотя для космических телескопов очень перспективен ИК-диапазон;
- время однократного обзора доступного участка небесной сферы, необходимое для обнаружения ОНТ, не более 1–2 ч;



Телескоп "ATLAS-2", принадлежащий Институту астрономии Гавайского университета; расположен на вулкане Мауна-Лоа (Гавайи). Фото Гавайского университета.

– необходимы высокоскоростные линии связи с космическим аппаратом (в случае использования телескопа космического базирования), мощное компьютерное оборудование (возможно, на борту космического аппарата) и математическое обеспечение для получения оперативной информации о новых объектах также в течение 1–2 ч;

– для космических средств может быть поставлено требование – обнаруживать тела, "приходящие" с дневного неба.

В мире для решения задачи поиска ОНТ в ближнем космическом пространстве развиваются программы создания скромных в размерах, но более оперативных систем. Например, в США создаются и уже начали работать телескопы системы "ATLAS" (The Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System – система

последнего предупреждения о столкновении астероида с Землей). В полном варианте предлагается разместить в 5–6-ти местах на Земле системы, имеющие на общей монтажке от двух до четырех 50-см широкоугольных телескопов (<http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/ATLAS/>). Предполагается, что обзор всей доступной области неба будет осуществляться ежесуточно. Система будет наиболее эффективна для задач обнаружения ОНТ в околоземном космическом пространстве, хотя объекты крупнее 100 м будут регистрироваться примерно за 10 суток на расстояниях в десятки миллионов километров и более.

В России наблюдения с целью обнаружения ОНТ проводятся, главным образом, по программам исследований в обсерваториях РАН и

в вузовских обсерваториях. Часть телескопов академической сети ISON работает по разрешению и с поддержкой госкорпорации «Роскосмос», однако основная задача этой сети – наблюдения за космическим мусором. В последнее время по этой тематике начала работать сеть "МАСТЕР" (МГУ им. М.В. Ломоносова; Земля и Вселенная, 2011, № 3), создававшаяся и успешно используемая для астрофизических наблюдений – мониторинга космических гамма-вспышек. Обе сети "используют" в качестве наблюдательных средств малоапертурные оптические телескопы (до 50 см). Такие инструменты могут быть эффективны для обнаружения ОНТ в околоземном пространстве, но пока они используются для наблюдений АСЗ лишь эпизодически. Координация между сетями

Проект разрабатываемой в ИНАСАН обзорной системы мониторинга околоземного пространства "INF" с помощью роботизированной мультиапертурной системы, состоящей из широкоугольных телескопов VT-78d.

Рисунок ИНАСАН.

(группами) практически отсутствует.

В Институте астрономии РАН разработана концепция обзорной системы мониторинга околоземного пространства "INF" (INASAN Neo Finder – поиск ОСЗ ИНАСАН) на основе системы (кластера) широкоугольных телескопов VT-78d (апертура – 25 см, поле зрения – 78 квадратных градусов). Система из 8-ми роботизированных телескопов будет способна в среднем за 20 ч до столкновения с Землей обнаружить тела размером от 10 м. Помимо решения этой, основной, задачи перспективный кластер способен решать дополнительные научные задачи: наблюдения источников гравитационных волн, гамма-вспышек. Пока ведется работа над прототипом системы.

ОБНАРУЖЕНИЕ ОНТ НА ДНЕВНОМ НЕБЕ

За рубежом и в России разрабатываются системы космического базирования для поиска опасных небесных тел, такие системы имеют значительные преимущества перед наземными средства-



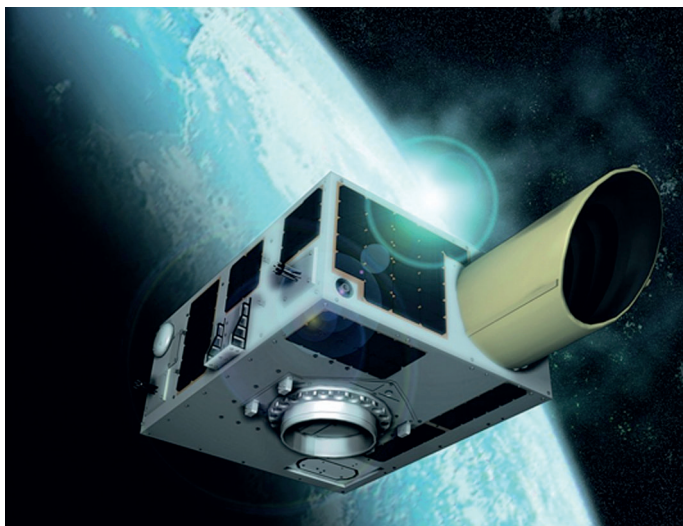
ми. Важные преимущества космических систем: возможность проводить наблюдения в гораздо большей области неба, включая пространство "внутри" орбиты Земли и за Солнцем (при использовании удаленного от нашей планеты космического аппарата); меньший фон неба; возможность круглосуточной работы. Недостатки космических систем: относительная дороговизна и меньшая надежность, поскольку их обслуживание и ремонт связан с большими трудностями. Поэтому космические средства обнаружения ОНТ только начинают использоваться.

Один из примеров таких средств – канадский микро-спутник "NEOSSat" (The Near Earth Object Surveillance Satellite – спутник для наблюдений околоземных объектов) массой 74 кг, запущенный на орбиту в феврале

2013 г. Он используется для наблюдений АСЗ с блеском до 20^m и диаметром более 500 м, орбиты которых "лежат" внутри орбиты Земли; успешно участвовал в кампании по наблюдениям астероида 2012 TC4. Спутник способен вести непрерывную съемку пространства в пределах 45–55° от Солнца, а также в областях до 40° ниже и выше плоскости эклиптики.

Наземные телескопы и телескопы, размещенные в ближнем космосе, не способны обнаруживать тела, "приходящие" с дневного неба. Челябинское событие 15 февраля 2013 г. послужило подтверждением этого принципиального факта. Для того, чтобы наблюдать такие астероиды, нужны телескопы, удаленные от Земли на значительное расстояние.

В ИНАСАН разработана концепция системы



Канадский микроспутник "NEOS-Sat" на околоземной орбите. Рисунок Канадского космического агентства.

СОДА (Система Обнаружения Дневных Астероидов) для поиска "опасных" небесных тел, "приходящих" с дневного неба. Главная идея состоит в следующем: космическая система состоит из 1–2-х космических аппаратов, размещенных в окрестности точки Лагранжа L1 (в системе Земля–Солнце) на расстоянии около 1,5 млн км от Земли; телескоп, находящийся в окрестности точки L1, будет "видеть" ОНТ, летящие к Земле от Солнца, при благоприятных для наблюдений значениях фазового угла. При этих условиях видимая звездная величина ОНТ размером 10 м на расстоянии 1 млн км составит 17^m. Предварительный анализ этих условий показывает, что задача обнаружения декаметровых ОНТ, летящих со стороны Солнца (при условии размещения телескопа в точке L1) может быть решена с помощью относи-

тельно небольшого телескопа с апертурой около 0,3 м.

Главный режим работы космической обсерватории для обнаружения ОНТ, летящих со стороны Солнца, – регулярный обзор кольцеобразной области небесной сферы с центром в направлении на Землю. При этом просматривается конусный барьер – конусообразное пространство, образуемое полем зрения вращающегося телескопа. Таких барьеров может быть несколько. Сначала опасное тело наблюдается при пересечении барьера(ов), затем обнаруженный астероид постоянно наблюдают до сближения с Землей, что позволяет максимально уточнить его орбиту и определить возможное место падения. Наблюдения прекращаются примерно за 4 ч до возможного столкновения (это соответствует, при скорости сближения, равной 19 км/с, расстоянию от Земли – около 270 тыс. км).

Авторы статьи считают оптимальным вариант из двух космических аппаратов, "разнесенных" по гало-орбите вокруг точки L1. Такая конфигурация позволит использовать режим триангуляции и существенно увеличить точность определения орбиты ОНТ, а значит, и точность определения точки "входа" в атмосферу, если орбита столкновительная.

О КООПЕРАЦИИ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ ОНТ

В России важная проблема обнаружения ОНТ пока не решается эффективно, на системном уровне. Назовем две главные взаимосвязанные проблемы – отсутствие базовой финансовой поддержки от государства (в отличие от США, ЕС, Китая, Южной Кореи) и эффективной кооперации. Экспертная рабочая группа по космическим угрозам при Совете РАН по космосу (руководитель группы Б.М. Шустов) подготовила несколько вариантов проектов общегосударственной программы по созданию национальной системы противодействия космическим угрозам, включая АКО. Дальнейшая судьба этих предложений пока не ясна.

Проблема АКО, по сути, глобальная и для ее решения необходимы усилия многих стран, и такая работа ведется. Под эгидой ООН кооперацией астрономических институтов и других организаций выполняется проект "IAWN" (International Asteroid Warning Network – международная сеть предупреждения об опасных астероидах). ИНАСАН участвует в работе сети, начиная с 2016 г. В рамках международного сотрудничества "IAWN" в 2017 г. был проведен наблюдательный эксперимент по обнаружению и последую-

щему наблюдению астероида 2012 TC4. На протяжении четырех месяцев астрономы из США, Канады, Колумбии, Германии, Израиля, Италии, Японии, Нидерландов, России и ЮАР отслеживали астероид с помощью наземных и космических телескопов в оптическом и радиодиапазонах с целью изучения его орбиты, формы, особенностей вращения и состава. Полученный в рамках кампании богатый наблюдательный материал позволил, в частности, точно рассчитать орбиту астероида 2014 TC4 и исключить

возможность столкновения объекта с Землей при последующих сближениях. Со стороны России наблюдения астероида 2012 TC4 были проведены Терскольским филиалом ИНАСАН на 2-м телескопе "Цейсс-2000". Успешное проведение кампании по наблюдениям астероида 2012 TC4 показало готовность ученых разных стран к участию в серьезном международном сотрудничестве по предотвращению потенциальной угрозы для Земли, исходящей от околоземных объектов и проде-

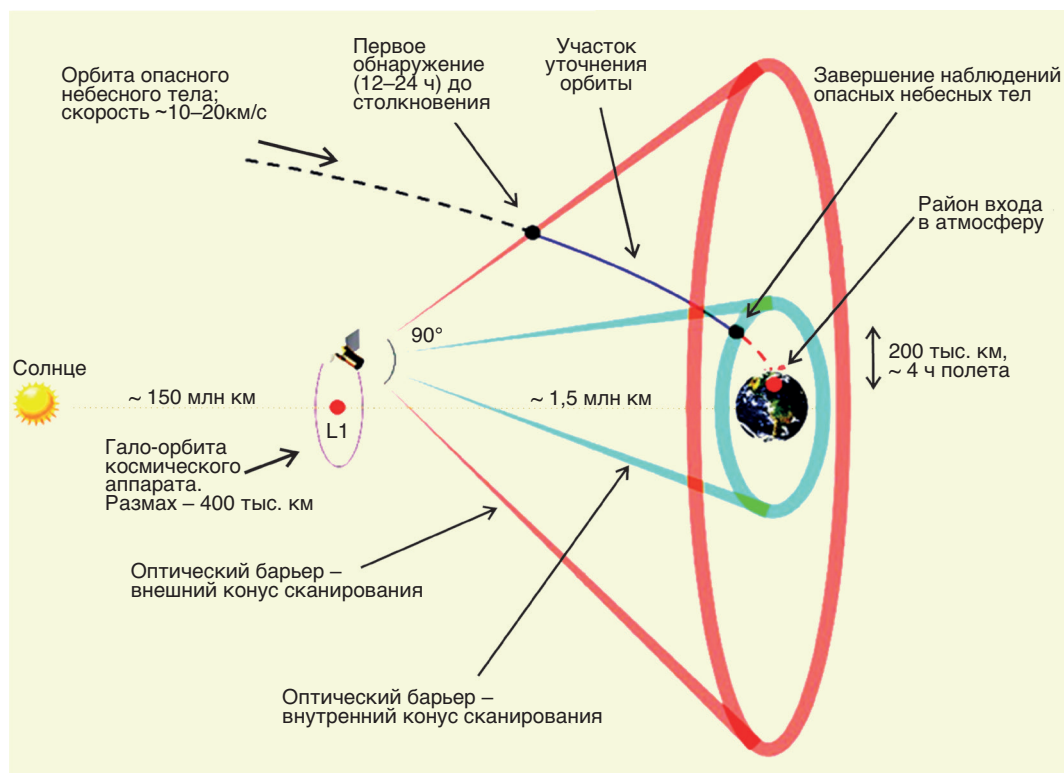


Схема работы обсерватории системы СОДА (ИНАСАН) в варианте, когда используется один космический аппарат. Оптимальное число конических барьеров – 3, но на рисунке показаны только 2 крайних барьера. Рисунок ИНАСАН.



Обсерватория Терскольского филиала ИНАСАН: а – башня; б – 2-м телескоп "Цейсс-2000", использовавшийся для наблюдения астероида 2012 TC4; в – фотография астероида 2012 TC4. Астероид (точечный объект) отмечен желтым кружком. Фото ИНАСАН.

монстрировало работоспособность сети "IAWN". В феврале 2018 г. в проект "IAWN" включились Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Крымская астрофизичес-

кая обсерватория РАН, Институт солнечно-земной физики СО РАН и Коровская обсерватория УрФУ.

Итак, российские научные центры готовы к рабо-

те по решению важной задачи обнаружения ОНТ, но для их эффективной работы как на внутрироссийском, так и на международном уровне необходима поддержка государства.

Гипотеза о возможности обнаружения темной материи

Недавнее неожиданное открытие говорит о том, что ранняя Вселенная выглядела совсем не так, как считалось ранее. Ученые Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики доказали, что небольшая доля темной материи должна иметь слабый электрический заряд и имеет способность вступать в электромагнитное взаимодействие с обычной материей. В традиционной гипотезе высказано предположение о том, что темная материя обладает лишь силой гравитации.

Согласно разработанной несколько лет назад модели Λ CDM (Lambda-Cold Dark Matter – лямбда холодной темной материи), кроме обычной, барионной материи, из которой состоят звезды и галактики, Вселенная наполнена на 22% темной материей (Земля и Вселенная, 2006, № 1; 2010, № 1; 2012, № 5). Вывод о ее существовании был сделан на основе наблюдения за астрономическими объектами, которые вели себя так, словно на них влияет скрытая от прямого наблюдения масса. Предполагается, что темная материя взаимодействует с обычным

веществом только посредством гравитационных сил, поэтому ее нельзя обнаружить, регистрируя электромагнитное излучение.

В период с 2015 по 2018 гг. с помощью радиотелескопов проводилось сканирование небосвода: таким образом астрофизики надеялись уловить слабые сигналы от первых звезд во Вселенной, надеясь обнаружить следы воздействия звезд на окружающий их газ, находящейся на расстоянии более 13 млрд св. лет от нас. Исследования проводил международный коллектив ученых, выполнявших работу по программе EDGES (Experiment to Detect the Global EoR Signature – эксперимент по нахождению следов глобальной эпохи реионизации). Собранные данные показали, что спустя 200 млн лет после Большого взрыва температура барионной материи составляла лишь половину от теоретически предсказанных значений. Такой результат слабо согласуется со стандартной космологической моделью; однако его можно объяснить – допустив, что обычное вещество охлаждается при слабом электромагнитном взаимодействии с темной материей. Кроме того, космологи пришли к заключению, что ранний космос был гораздо холоднее, чем думали прежде.

Командой ученых EDGES собраны данные о нейтральном водороде, наполнявшем Вселенную в первые несколько миллионов лет после Большого взрыва. Этот газ поглощал электромагнитное излучение,

это привело к наступлению «темных веков», как космологи поэтически называют этот период (380 тыс. – 550 млн лет после Большого взрыва). Хотя космос был заполнен рассеянным фоновым светом и реликтовым излучением – послесвечением от Большого взрыва, но нейтральный газ поглощал его на определенных длинах волн.

Команда, работавшая по проекту EDGES, искала именно этот спектр поглощения, а он оказался гораздо более сильным, чем было возможно, по современным представлениям. Когда во Вселенной формировались первые звезды, то их энергия должна была разогреть газ. В итоге он достигал достаточно большой температуры и переставал поглощать реликтовое излучение. Сигналы о поглощении прекратились, и «темные века» закончились.

В соответствии с новой гипотезой, предполагают, что менее 1% темной материи все-таки имеет слабый электромагнитный заряд, который в миллион раз меньше заряда электрона. Подтверждение этого факта в том, что ударные волны от сверхновых в Млечном Пути должны выбросить за пределы галактического диска все слабо заряженные частицы, а сильное электромагнитное поле предотвращает их возвращение. Однако результаты наблюдений говорят о том, что в диске находится большое количество темной материи.

*Журнал «Nature»,
2018. Т. 558. № 7694. С.
182–185.*

Физика нейтронных звезд

А.Ю. ПОТЕХИН,
доктор физико-математических наук
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

В 2018 г. исполнилось 85 лет теоретическому предсказанию существования нейтронных звезд (Земля и Вселенная, 1985, № 2; 1992, № 3; 2000, № 6). Это – самые плотные из известных звезд, что делает их уникальными и по многим другим параметрам. Такие параметры, как плотность и давление вещества в их недрах, ускорение силы тяжести на поверхности, напряженность магнитного



поля несравнимы с теми, которые когда-либо были созданы человеком в лаборатории или природой в иных наблюдаемых объектах. Поэтому нейтронные звезды стали бесценными естественными лабораториями для проверки передовых физических теорий – от теории относительности и теории элементарных частиц до квантовой электродинамики и физики сильно неидеальной плазмы.

НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ –
РАЗНОВИДНОСТЬ КОМПАКТНЫХ
ЗВЕЗД

Нейтронные звезды находятся в одном ряду с обычными звездами по своей массе $M \sim 1\text{--}2 M_{\odot}$, но при этом они имеют в сотни тысяч раз меньшие радиусы $R \sim 10\text{--}13$ км. Такие размеры определяются главным образом балансом

сил гравитации и давления вырожденных нейтронов. Ускорение свободного падения у поверхности такой звезды превышает 10^{14} см/с², а ее средняя плотность в два-три раза превосходит среднюю плотность тяжелого атомного ядра – нормальную ядерную плотность $\rho_0 = 2,8 \times 10^{14}$ г/см³. Столь плотное вещество нель-

зя получить в лаборатории, и его свойства не ясны. Не вполне известен даже его состав – ведь нейтронные звезды, несмотря на название, состоят не только из нейтронов. Для описания вещества этих звезд построены разнообразные теоретические модели, и выбор в пользу одной из

них возможен только на основе наблюдений. Поэтому исследования нейтронных звезд можно использовать для проверки теоретических моделей экстремально сжатого вещества. И наоборот, прогресс в изучении экстремальных состояний вещества создает предпосылки для построения корректных моделей нейтронных звезд и адекватной интерпретации их наблюдений.

Нейтронные звезды – не единственные, в недрах которых вещество сжато до плотностей, недостижимых в лаборатории. Другие представители класса компактных звезд – это белые карлики и гипотетические кварковые звезды. У белых карликов гравитационному сжатию противостоит давление вырожденных электронов, у кварковых звезд – давление материи, состоящей из кварков, не сгруппированных в адроны. Белые карлики, крошечные по сравнению с обычными звездами, при массе примерно $M_{\odot}$, имеют радиус, сравнимый с радиусом Земли, – и все же он во много сотен раз больше радиуса нейтронной звезды. Кварковые звезды при такой же массе, напротив, могут быть еще меньше, чем нейтронные. Однако, в отличие от нейтронных звезд и белых карликов, кварковые звезды пока не наблюдались, и сама возможность их существования твердо не установлена.

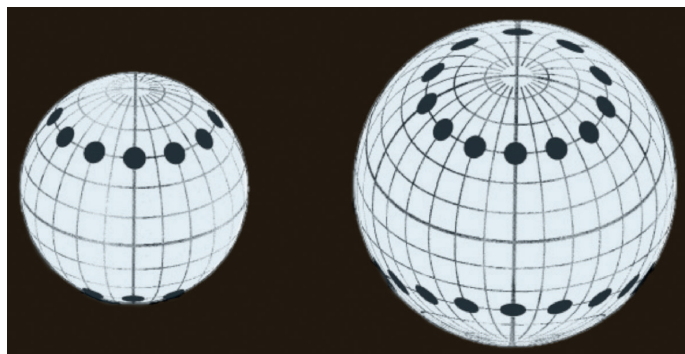
Нейтронные звезды рождаются при взрывах сверхновых звезд II типа (Земля и Вселенная, 1998, № 2; 2008,

№ 1). Такой взрыв случается, когда звезда-предшественник сверхновой израсходует все свое ядерное «горючее» – сначала водород, затем образовавшийся из него гелий, а потом и более тяжелые химические элементы, вплоть до кислорода и магния. Конечным продуктом последующих ядерных превращений становятся изотопы элементов группы железа, которые накапливаются в центре звезды. Только давление вырожденного электронного газа удерживает такое железо-никелевое ядро звезды от коллапса – схлопывания к центру под действием силы тяжести. Но уже через несколько дней после выгорания кислорода железное ядро достигает предела Чандрасекара – максимальной массы, гравитационному сжатию которой еще способно противостоять давление вырожденных электронов. Тогда наступает коллапс. Выделение гигантской гравитационной энергии (около 10^{53} эрг) приводит к возникновению ударной волны, которая «сбрасывает» внешние оболочки звезды-гиганта со скоростью, достигающей до 10% от скорости света, тогда как внутренняя часть звезды продолжает сжиматься. При этом атомные ядра сливаются в одно гигантское ядро. Если его масса не превышает некоторый максимум (предел Оппенгеймера-Волкова), при котором гравитационное сжатие еще может быть остановлено давлением нейтронов и других адронов, то образуется

нейтронная звезда, а иначе – черная дыра (Земля и Вселенная, 2010, № 3; 2016, № 4). При рождении нейтронной звезды большую часть выделившейся гравитационной энергии уносят нейтрино, около 1% переходит в кинетическую энергию разлетающихся газопылевых оболочек, впоследствии формирующих туманность – остаток сверхновой, и лишь около 0,01% – в электромагнитное излучение. И все же это излучение, наблюдаемое как сверхновая, может затмить свечение целой галактики.

Не всякая звезда может завершить свою эволюцию как сверхновая: такая участь уготована лишь достаточно массивным звездам, с массами более $8M_{\odot}$. Менее массивная звезда в конце своего «жизненного» пути, пройдя через стадию гиганта, постепенно «сбрасывает» внешние оболочки, а оставшаяся центральная часть, сжимаясь, превращается в белый карлик.

Для нейтронных звезд, в отличие от обычных, большую роль играют эффекты общей теории относительности (ОТО). Например, частота фотона, испущенного нейтронной звездой, при удалении от нее уменьшается на десятки процентов вследствие искривления пространства-времени у поверхности (этот эффект называется гравитационным красным смещением). При этом траектория фотона искривляется, что позволяет земному наблюдателю «заглянуть за горизонт»



Искажение вида звезды из-за искривления траектории фотонов. Звезда, которая в отсутствие эффектов ОТО выглядела бы так, как на рисунке слева, с их учетом выглядит так, как на рисунке справа. Наблюдаемый радиус увеличивается, и становится видна часть поверхности, которая была скрыта за горизонтом. Рисунок NASA/GSFC.

нейтронной звезды. Отсюда вытекают два взаимосвязанных следствия: во-первых, количественная теория нейтронных звезд должна быть релятивистской; во-вторых, наблюдения нейтронных звезд открывают уникальные возможности для измерения эффектов ОТО и проверки ее предсказаний. Благодаря этому разнообразные предсказания ОТО проверены с высокой степенью точности, а на альтернативные модели гравитации наложены жесткие ограничения.

Еще одна замечательная особенность многих нейтронных звезд – наличие у них магнитного поля, недостижимого в земных условиях. Распределение магнитных полей радиопульсаров – космических источников периодических радиоимпульсов – охватывает диапазон от 10^4 Тл до 10^{10} Тл с максимумом вблизи 10^8 Тл (для сравнения – самое сильное магнитное поле, достигнутое в лаборатории без разрушения установки, составляет 100 Тл). Магнитные поля магнитаров – нейтронных звезд с особенно сильными магнитными поля-

ми – достигают $10^{10} - 10^{11}$ Тл у поверхности, а в глубине звезды, возможно, доходят до 10^{12} Тл.

НЕМНОГО ИСТОРИИ

Нейтронные звезды были теоретически предсказаны как вероятный результат взрывов сверхновых звезд в 1933 г. Вальтером Бааде (Земля и Вселенная, 1969, № 1) и Фрицем Цвикки. Они же предложили и сам термин "сверхновая" для того, чтобы отличать эти необычайно яркие объекты от более многочисленных Новых. Как теперь известно, Новые звезды возникают из-за термоядерного горения вещества, осевшего на поверхность белых карликов. Сверхновые же, как догадались В. Бааде и Ф. Цвикки, вспыхивают при гравитационном коллапсе, а сжатое вещество образует нейтронную звезду.

Нейтронные звезды больше 30 лет после своего предсказания оставались гипотетическими объектами, так как астрономия того времени

не располагала инструментами, которые позволили бы их обнаружить. Но они привлекали внимание теоретиков. В 1938 г. Ф. Цвикки оценил максимальную энергию связи нейтронной звезды и гравитационное красное смещение фотонов, испущенных с ее поверхности. Меньше чем через год Ричард Толмен и Роберт Оппенгеймер со своим учеником Джорджем (Георгием) Волковым вывели уравнение гидростатического равновесия сферически симметричного тела в ОТО. На этой основе Р. Оппенгеймер и Г. Волков оценили предельную массу $M_{\max}$ нейтронной звезды. Правда, их оценка оказалась в несколько раз заниженной из-за пренебрежения взаимодействием между нейтронами. Только в 1959 г., используя значительно развитую к тому времени теорию ядра, канадский астрофизик Аластер Кэмерон получил первую реалистичную оценку $M_{\max} \sim 2M_{\odot}$. Он же первым указал на то, что в ядре нейтронной звезды могут присутствовать гипе-

роны (барионы, содержащие "странные" кварки). В том же году член-корреспондент АН СССР А.Б. Мигдал отметил возможную сверхтекучесть нуклонов в нейтронной звезде. В середине 1960-х гг. были проведены первые расчеты нейтринного излучения из недр нейтронной звезды и ее остывания (немалый вклад в эти исследования внес Аластер Кэмерон). В те же годы академик В.Л. Гинзбург предсказал наличие у нейтронных звезд магнитного поля порядка 10^8 Тл, а доктор физико-математических наук Н.С. Кардашёв – образование туманностей вокруг таких замагниченных звезд (они известны как пульсарные туманности, или плеионы).

Уже первые оценки показали, что поверхность типичной нейтронной звезды может иметь температуру в сотни тысяч (или миллионы) градусов, а значит, должна испускать тепловое излучение – в основном в виде мягких рентгеновских лучей. Надежды обнаружить такое излучение появились с зарождением рентгеновской астрономии в начале 1960-х гг., однако фактически тепловые рентгеновские компоненты в спектрах нейтронных звезд стали уверенно регистрировать лишь в 1990-х гг. – после запуска 1 июня 1990 г. немецкой космической обсерватории "ROSAT" с рентгеновским телескопом, передавшим более 150 тыс. изображений

рентгеновских источников с разрешением в несколько угловых секунд. В XXI в. измерения рентгеновских спектров вышли на качественно новый уровень благодаря работе космических обсерваторий "ХММ-Ньютон" и "Чандра" (Земля и Вселенная, 2014, №№ 4, 5; 2017, № 4).

Впервые нейтронные звезды обнаружили себя как радиопульсары, первый из них был открыт в 1967 г. группой радиоастрономов в Кембридже (Великобритания). Молодая сотрудница этой группы Джоселин Белл обнаружила странные сигналы в записях радиотелескопа. Таинственные импульсы повторялись с исключительно стабильным периодом, равным 1,33 с (Земля и Вселенная, 1970, № 4). Вскоре она открыла еще несколько похожих радиоисточников. Объяснение им дал американский астроном Томас Голд, предложив модель этого феномена – быстро вращающейся нейтронной звезды с сильным магнитным полем. Она окружена протяженной плазменной магнитосферой, наполненной заряженными частицами, при этом генерируется когерентное направленное радиоизлучение, благодаря которому нейтронная звезда может наблюдаться как пульсар, если при ее вращении конус излучения "пересекает" луч зрения наблюдателя.

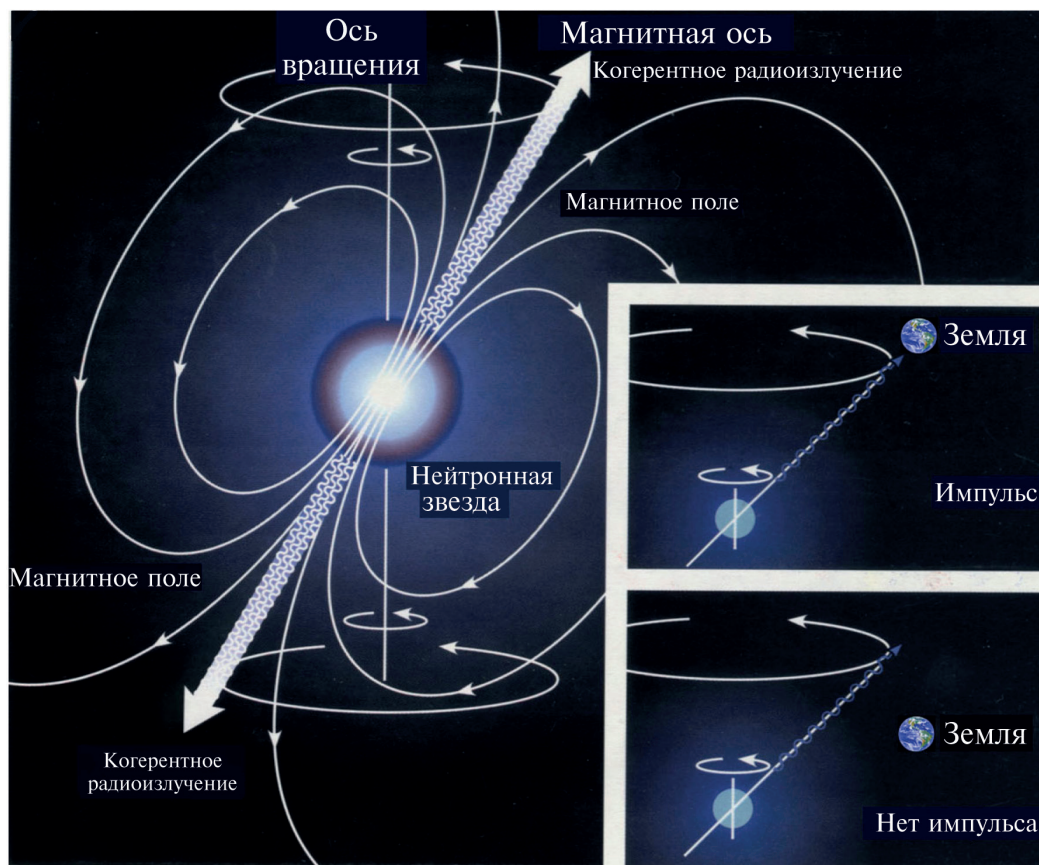
Еще до обнаружения пульсаров член-корреспондент АН СССР И.С. Шкловский сопоставил рентгеновские и опти-

ческие наблюдения ярчайшего рентгеновского источника Скорпион X-1 и заключил, что его излучение порождается аккрецией – оседанием на нейтронную звезду вещества со звезды-компаньона. Догадку И.С. Шкловского по праву можно считать открытием аккрецирующих нейтронных звезд. К сожалению, тогда его вывод был воспринят скептически, хотя впоследствии он подтвердился.

После открытия пульсаров теория и наблюдения нейтронных звезд стали развиваться бурными темпами. Теперь ежегодно появляется более тысячи посвященных им публикаций, а раз в несколько лет происходит открытие нового класса астрономических объектов, содержащих нейтронные звезды. В 1971 г. были открыты рентгеновские пульсары, в 1975 г. – барстеры (источники рентгеновских всплесков), в 1979 г. – источники мягких повторяющихся гамма-всплесков, в 1982 г. – миллисекундные пульсары, в 1996 г. – "радиотихие" изолированные нейтронные звезды, в 1998 г. – аномальные рентгеновские пульсары (о них будет речь ниже), в 2006 г. – быстрые радиотранзиенты (яркие радиопульсары, которые то обнаруживают себя, то исчезают), в 2008 г. – гамма-пульсары.

МНОГООБРАЗИЕ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Нейтронные звезды излучают во всех диапазонах электромагнитного спектра.



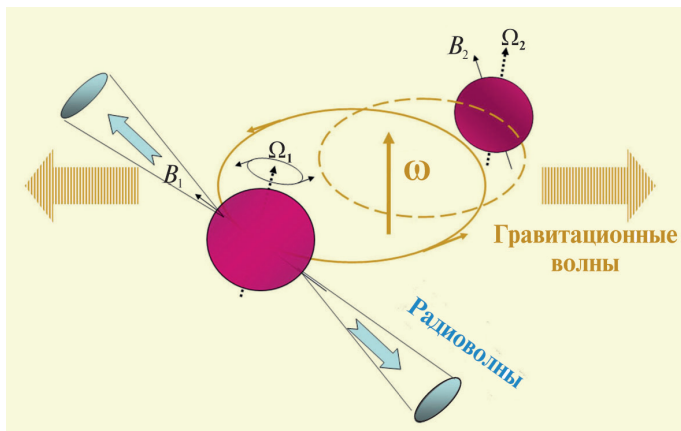
Принцип работы пульсара. На верхней врезке показано, как излучение пульсара "пересекает" луч зрения земного наблюдателя; при этом регистрируется импульс. На нижней врезке показан "молчащий" пульсар, луч которого не "пересекает" Землю. Рисунок Х. Чен, доработанный автором.

Большинство из них, как и полвека назад, наблюдаются как радиопульсары (их известно свыше 2600). Пульсирующее излучение, связанное с вращением нейтронной звезды, содержит важную дополнительную информацию. Так, одновременное измерение радиоизлучения на нескольких частотах позволяет по сдвигу фаз определить меру дисперсии, по которой при-

лизительно оценивается расстояние до пульсара. Измерение периода пульсаций и его производной по времени позволяет по порядку величины оценить возраст пульсара t и величину его магнитного поля B (точнее, его дипольной составляющей). Обычно период пульсаций составляет несколько секунд или десятых долей секунды, возраст пульсара оценивается от тысяч до десятков

миллионов лет, а магнитное поле $B \sim 10^7 - 10^9$ Тл. Но несколько процентов пульсаров имеют миллисекундные периоды, которые меняются чрезвычайно медленно. Этим пульсарам сотни миллионов и миллиарды лет, а их магнитные поля оцениваются как $B \sim 10^4 - 10^6$ Тл. Когда-то они входили в состав двойных систем с аккрецией. Перетекавшее на них вещество "приносило с собой" угловой

Пульсар, обращающийся с другой нейтронной звездой вокруг общего центра масс. Такая система интенсивно излучает гравитационные волны и проявляет другие эффекты, предсказанные в ОТО. Указаны направление диполей магнитных полей (B_1 и B_2) и осей вращения (Ω_1 и Ω_2) компонентов двойной системы, а также их общая ось вращения ω . Рисунок автора.



момент, ускоряя вращение, и способствовало затуханию магнитного поля.

Многие нейтронные звезды наблюдаются в двойных системах с другими нейтронными звездами, с белыми карликами и с обычными звездами. Неизвестны двойные системы, в которых компаньоном нейтронной звезды была бы черная дыра. Измерение параметров орбиты двойной системы позволяет получить дополнительную информацию о нейтронной звезде, в частности, оценить ее массу. Если вторая звезда в двойной системе тоже компактная (нейтронная звезда или белый карлик), то кроме обычных кеплеровских параметров орбиты, нередко удастся измерить параметры двойной системы, связанные с эффектами ОТО, – изменением углового момента из-за излучения гравитационных волн, смещением периастра, геодезической прецессией, задержкой фотонов при их прохождении вблизи звезды-компаньона (эффект Ша-

пиро). В таких случаях массы обеих звезд измеряются с высокой точностью, а ОТО неизменно получает дополнительное подтверждение.

Около 8% известных нейтронных звезд входит в состав двойных систем с аккрецией и проявляет себя рентгеновским излучением аккреционного диска, а также вспышками, возникающими из-за взрывного термоядерного горения аккрецированного вещества во внешних слоях звезды. Существуют два вида таких систем – это маломассивные рентгеновские двойные системы, в которых компаньон – звезда-карлик (белый или красный) с массой не более $2M_{\odot}$, и массивные двойные, в которых масса звезды-компаньона в несколько (а то и в десятки) раз превышает солнечную, а аккреция вещества на нейтронную звезду протекает весьма бурно.

Рентгеновские двойные могут быть источниками регулярного (периодического) и

нерегулярного излучения. В их числе есть рентгеновские пульсары, у которых излучение модулировано вращением нейтронной звезды; барстеры – нейтронные звезды, на поверхности которых время от времени происходит термоядерный взрыв; источники квазипериодических осцилляций и другие разновидности. Некоторые маломассивные двойные системы образуют рентгеновские транзиенты, у которых периоды активной аккреции (обычно в течение дней или недель) перемежаются с более длительными (несколько месяцев, а иногда и лет) «периодами спокойствия», во время которых видно только излучение нагретой поверхности звезды.

Зарегистрировано также и рентгеновское излучение более 100 изолированных нейтронных звезд. Часто такое излучение возникает в результате ускорения частиц в магнитосфере звезды. У некоторых нейтронных звезд (их известно более 40)

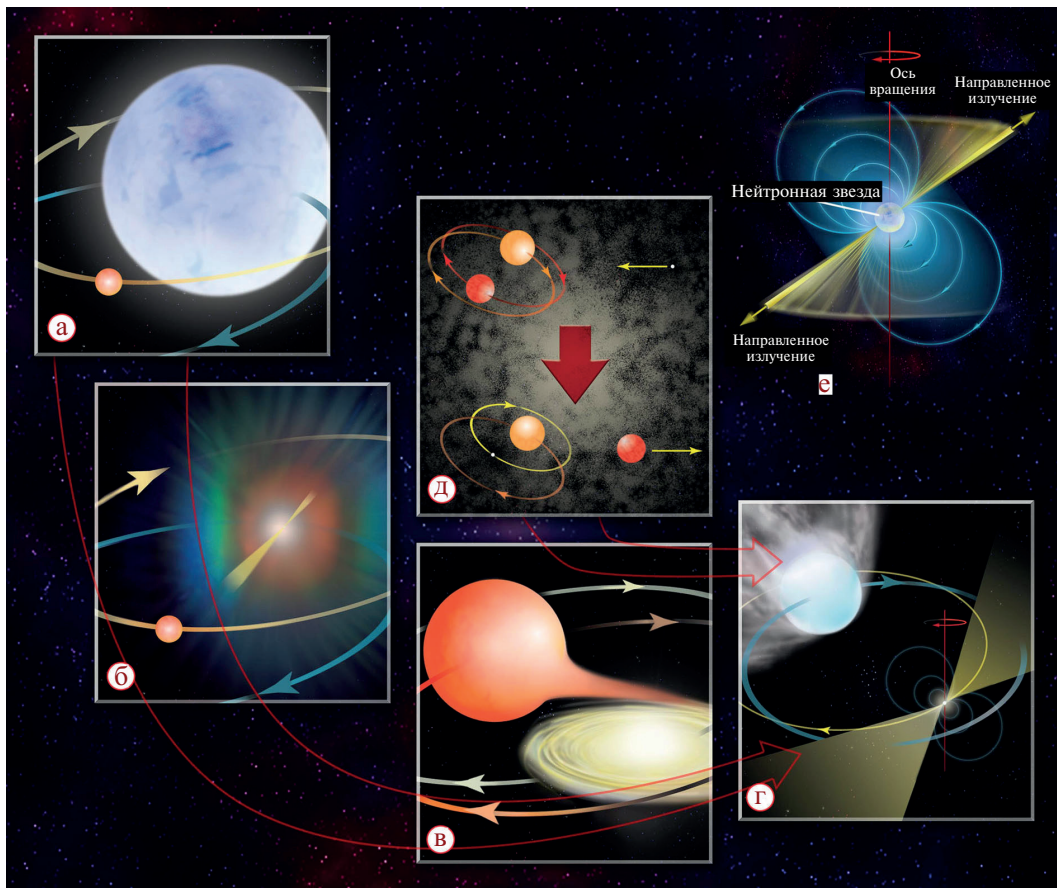
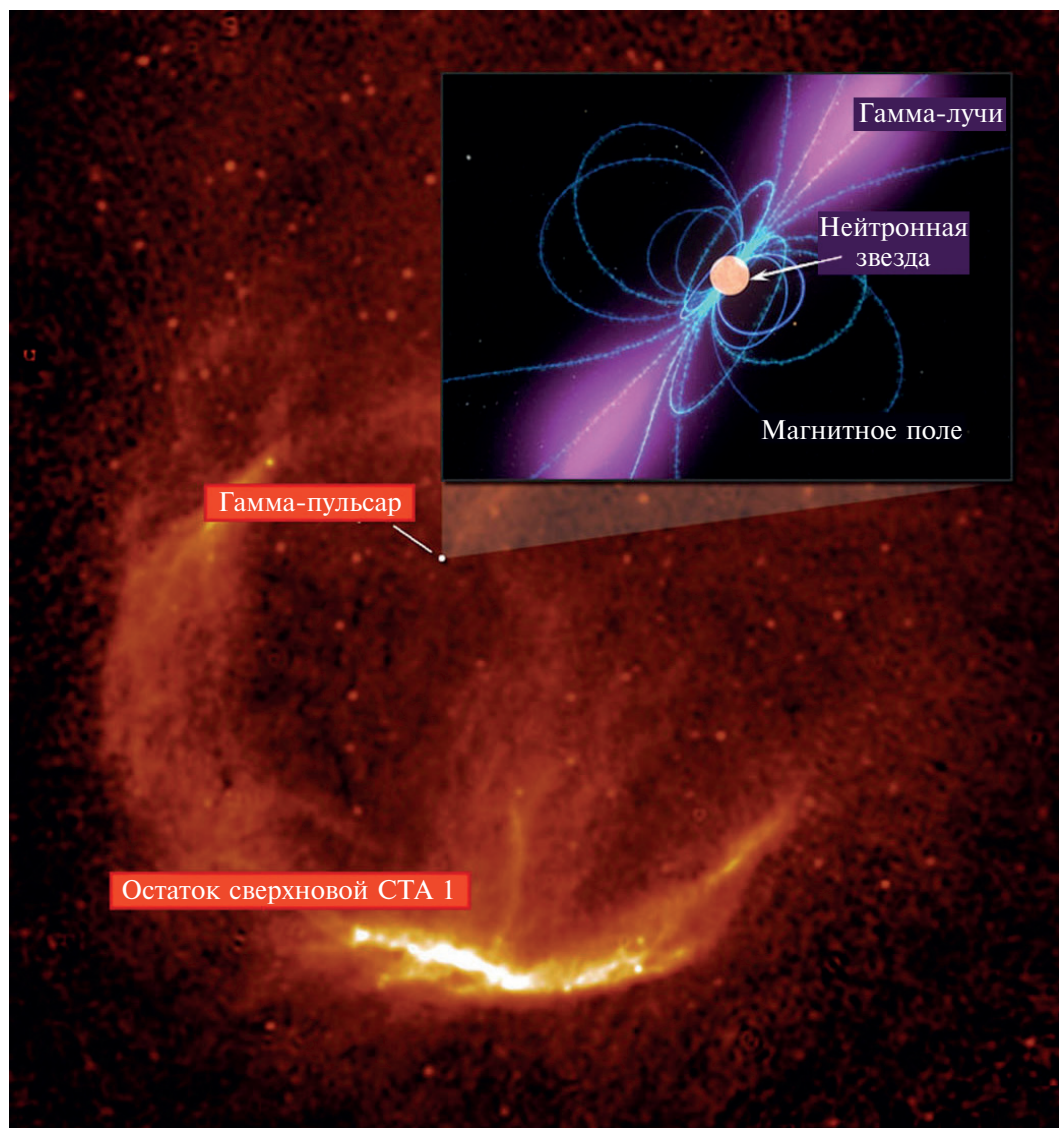


Схема возникновения рентгеновской двойной системы и миллисекундного пульсара (во врезках): а – звезда-сверхгигант и звезда Главной последовательности обращаются вокруг общего центра масс; б – массивная звезда, "израсходовав" свое ядерное горючее, взрывается как сверхновой; на ее месте остается нейтронная звезда; в – двойная система переживает взрыв сверхновой; звезда меньшей массы продолжает свою эволюцию и через миллиарды лет становится красным гигантом; г – момент окончания аккреции; нейтронная звезда становится миллисекундным пульсаром; д – процесс обмена двойной системы с одиночной звездой (вариант эволюции); е – миллисекундный пульсар с магнитным полем и излучением. Рисунок NRAO/NSF.

наблюдается тепловое рентгеновское излучение, исходящее с нагретой поверхности или из фотосферы. Иногда в спектре пульсара удастся выделить две тепловые составляющие, более жесткая из которых предположительно соответствует излучению «поляр-

ных шапок» (магнитное поле почти перпендикулярно к поверхности звезды), нагретых до нескольких миллионов градусов. Именно над ними генерируется сверхсильное электрическое поле, которое ускоряет заряженные частицы; часть из них бомбарди-

рует поверхность, нагревая ее. Мягкая рентгеновская тепловая составляющая спектра соответствует излучению остальной, менее горячей поверхности, которое может порождаться теплом, приходящим из ее недр. Распределение этого

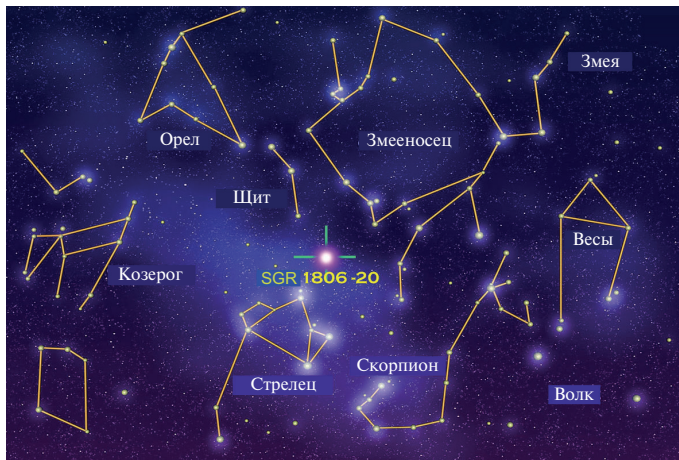


Расширяющийся остаток сверхновой СТА 1, располагающийся на расстоянии около 4600 св. лет от нас в созвездии Цефея. Вблизи его центра находится гамма-пульсар (его художественное представление помещено во врезке) – вращающаяся нейтронная звезда, излучающая направленные пучки гамма-лучей. Рисунок NASA/C. Пино (DRAO).

тепла по поверхности также неоднородно, потому что меняется теплопроводность коры звезды, зависящая от величины магнитного поля и его направления.

В отличие от нормальных и миллисекундных рентгеновских пульсаров, многие из которых входят в состав двойных систем, аномальные рентгеновские пульсары (сок-

ращенно АХР – anomalous X-ray pulsar) являются изолированными и обладают необычно долгими периодами – 6–24 с, но при этом имеют высокую рентгеновскую светимость.



Положение на небе источника "мягких" повторяющихся гамма-всплесков SGR 1806-20; 27 декабря 2004 г. он стал источником гамма-вспышки рекордной мощности. Рисунок NASA/GSFC.

Их периоды сравнительно быстро увеличиваются, указывая на то, что эти объекты обладают магнитными полями, превышающими 10^{10} Тл. Выдвигалось и альтернативное объяснение свойств AXP, основанное на предположении, что это – нейтронные звезды с "нормальными" магнитными полями ($\sim 10^8$ Тл), на которые медленно оседает вещество, оставшееся после взрыва сверхновой. Природа этих объектов еще не до конца ясна.

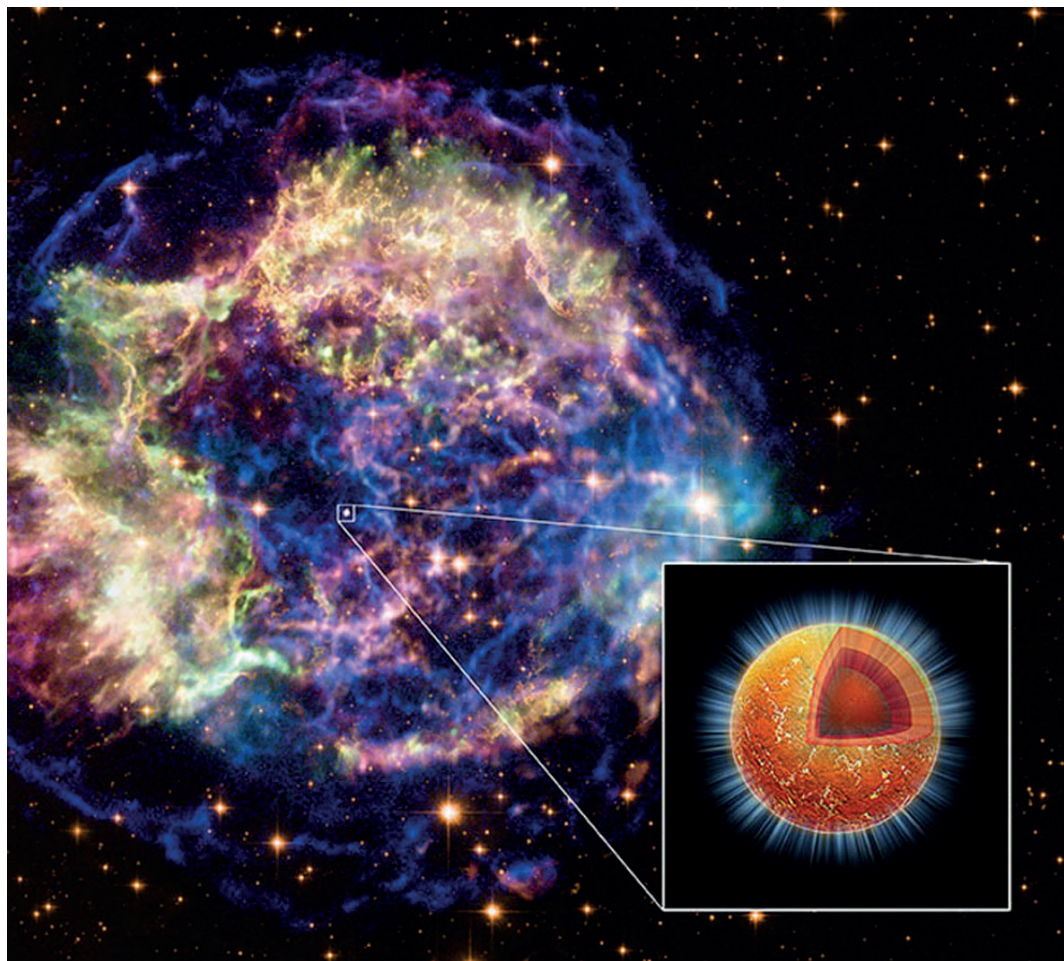
По своим свойствам к AXP очень близки источники мягких повторяющихся гамма-всплесков (SGR – soft gamma repeater). Первоначально эти два класса были разделены, потому что их наблюдательные проявления были различны. Однако со временем выяснилось, что некоторые AXP так же, как SGR, время от времени производят яркие вспышки в гамма-диапазоне. С другой стороны, SGR в периоды между вспышками ведут

себя так же, как AXP. Поэтому в современной астрофизике их объединяют в единый класс нейтронных звезд SGR/AXP. Гипотеза о том, что они являются магнитами, помогает объяснить не только аномальное замедление их вращения, но и энергетику их мощной вспышечной активности; она может обеспечиваться магнитной энергией, запасенной в теле магнитара. Физические механизмы высвобождения этой энергии продолжают обсуждаться; на этот счет есть несколько гипотез, но ни одна из них не является твердо установленной.

Важным событием в астрофизике стало открытие на пороге XXI в. "радиотихих" нейтронных звезд с тепловыми рентгеновскими спектрами. К ним относятся центральные компактные объекты (ЦКО) в остатках сверхновых и рентгеновские изолированные нейтронные звезды (XINS – X-ray isolated neutron stars). Известно около десятка ЦКО,

в излучении трех из них обнаружены пульсации, периоды которых довольно малы (0,1–0,42 с) и при этом весьма стабильны. Это указывает на то, что ЦКО имеют не слишком сильное крупномасштабное магнитное поле (около 10^7 Тл). С другой стороны, большая амплитуда пульсаций указывает на неоднородное распределение температуры по поверхности (по-видимому, в коре звезды скрыто сверхсильное тороидальное магнитное поле). С 2001 г. известны ровно семь XINS, в связи с чем их прозвали "великолепной семеркой"; предполагается, что это продукты эволюции магнитаров. Их периоды длиннее, чем у большинства обычных пульсаров – 3–16 с, магнитные поля имеют довольно высокие значения: $B \sim 10^9$ – 10^{10} Тл.

Экзотический рентгеновский источник 1RXS J14-1256.0+792204 с периодом 59 мс, открытый в 2008 г. и названный "Кальверой" (находится на расстоянии 250–1000 св. лет от нас в Малой Медведице), сначала рассматривался как возможный восьмой объект со свойствами XINS, но потом оказалось, что он близок по своим свойствам к ЦКО и имеет поле $B \sim 4 \times 10^7$ Тл.



Остаток сверхновой Кассиопея А, в центре которого находится "радиотихая" остывающая нейтронная звезда – центральный компактный объект с углеродной атмосферой (во врезке). Рисунок: NASA/CXC/STScI/ UNAM/Д. Паж, П.С. Штернин, М. Вейсс.

ЗАГАДКИ ЯДРА НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ

В нейтронной звезде выделяются две основные качественно отличные области – ядро (внешнее и внутреннее) и оболочка (твердая кора, жидкий океан и атмосфера). Вещество внешнего ядра, составляющего большую долю массы типичной

нейтронной звезды, представляет собой нейтронную жидкость с примесью протонов, электронов и μ -мезонов (мюонов); причем все составляющие чрезвычайно вырождены. Внутреннее ядро есть только у достаточно массивных нейтронных звезд с массами не менее $1,5M_{\odot}$, оно занимает центральную область с плотнос-

тью больше $\rho = 2\rho_0$, радиус которой в самых массивных нейтронных звездах может достигать до нескольких километров. Состав и свойства вещества во внутреннем ядре неизвестны, так как результат их расчета в значительной степени зависит от используемого теоретического аппарата; поэтому исследование нейтронных

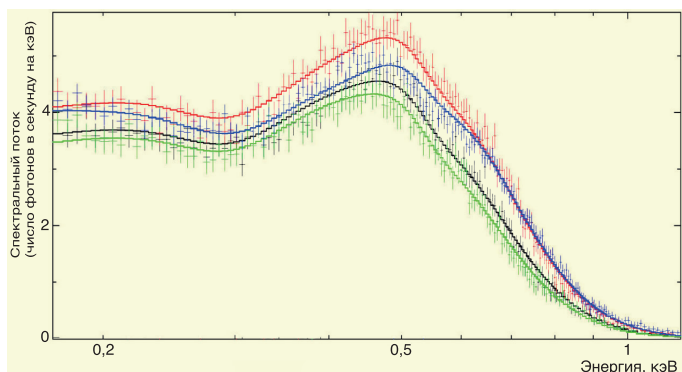


График сравнения наблюдаемого рентгеновского спектра одного из представителей "великолепной семерки" – RBS1223, находящегося в созвездии Волосы Вероники (отрезки погрешностей), для четырех фаз вращения с результатами расчетов (кривые), выполненными с помощью модели частично ионизированной водородной атмосферы с сильным магнитным полем, расположенной на конденсированной железной поверхности. Цвета соответствуют четвертям полного периода вращения. По данным V. Hambaryan et al., 2011, A&A 534, A74.

звезд важно не только для астрофизики, но и для физики ядра и элементарных частиц. Рассматриваются такие теоретические возможности: появление различных гиперонов; образование бозонного конденсата из коллективных возбуждений, имеющих свойства π - или К-мезонов (пионов или каонов); деконфайнмент (confinement – удержание, заточение) – фазовый переход к кварковой материи.

В ядре нейтронной звезды адроны (во внешнем ядре – нуклоны) образуют сильно взаимодействующую вырожденную жидкость, а лептоны (электроны и мюоны) представляют собой почти идеальный вырожденный газ. Рассчитать свойства этого вещества довольно сложно, для этого применяются различные упрощения. Исследования нейтронных звезд должны помочь в отборе наиболее адекватных теоретических методов описания сверхплотной материи.

По мере остывания нейтронной звезды барионы в

значительной части ядра становятся сверхтекучими. Сверхтекучесть нейтронов и протонов при плотностях, близких к ядерной плотности ρ_0 или превышающих ее, предсказывают все современные теории, но оценки критических температур сверхтекучести сильно варьируются в диапазоне от 10^8 до 10^{10} К. Сверхтекучие протоны образуют сверхпроводящую жидкость. Сверхтекучесть влияет на теплоемкость, на теплопроводность и на скорость реакций, приводящих к излучению нейтрино и остыванию ядра звезды.

ОБОЛОЧКИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Не только сверхплотное ядро нейтронной звезды, но и оболочки находятся большей частью в таких условиях, которые невозможно создать в лаборатории. По земным меркам они характеризуются сверхвысокими значениями давления, плотности, температуры и

магнитного поля. Их оболочки различаются по своему составу, агрегатному состоянию и по своей роли в эволюции звезды и ее свойствах.

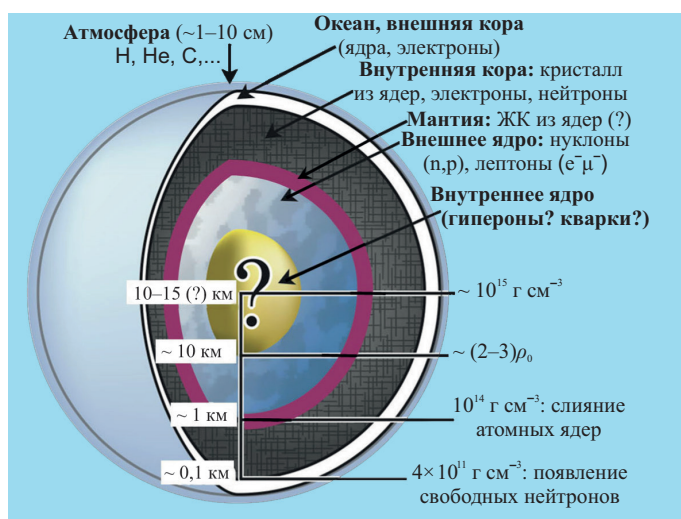
Вещество самых нижних оболочек, примыкающих к ядру нейтронной звезды, представляет собой жидкость из нейтронов и электронов, в которую погружены атомные ядра. Нейтроны и электроны в этих слоях сильно вырождены, а ядра являются нейтронно-избыточными – число нейтронов в них может в несколько раз превышать число протонов, и лишь гигантское давление удерживает их от распада. Электростатическое взаимодействие ядер настолько сильно, что упорядочивает их в кристаллическую решетку, которая форми-

Строение нейтронной звезды. Указана ядерная плотность ρ и ρ_0 (в г/см³) ее внутренних слоев. Рисунок NASA/GSFC, доработанный автором.

рует твердую кору. Между корой и ядром звезды может находиться мантия (ее существование предсказывается не всеми моделями плотной материи). В мантии атомные ядра принимают экзотические формы протяженных цилиндров или пластин. Такое вещество ведет себя подобно жидким кристаллам.

Кора нейтронной звезды делится на внешнюю и внутреннюю. Внешняя кора отличается отсутствием свободных нейтронов. С уменьшением плотности электростатическое взаимодействие между ядрами ослабевает, и в итоге кристаллическая решетка плавится, превращаясь в кулоновскую жидкость. Положение границы плавления (которую можно назвать "дном океана" нейтронной звезды) зависит от температуры и химического состава этой жидкости.

Особое значение имеет теплоизолирующая оболочка, определяющая плотность потока фотонов, испускаемых нейтронной звездой. Главным регулятором этого потока служит теплопроводность в "полоске чувствительности", играющей роль своего рода "бутылочного горлыш-

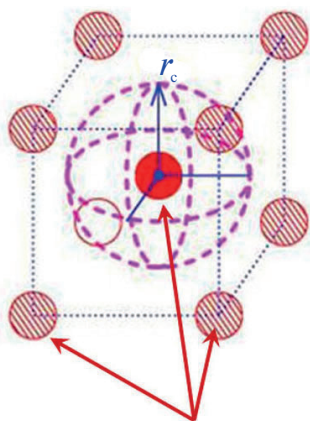


ка", через которое тепло просачивается наружу. Положение "полоски чувствительности" зависит от массы и радиуса звезды, ее температуры, магнитного поля и химического состава оболочки. Поскольку теплоперенос поперек сильного магнитного поля затруднен, то ее глубина залегания может меняться: там, где поле сильнее наклонено к поверхности, она расположена глубже. Как правило, она охватывает нижний слой "океана" и верхнюю часть коры, ее плотность $\rho \sim 10^5 - 10^9$ г/см³.

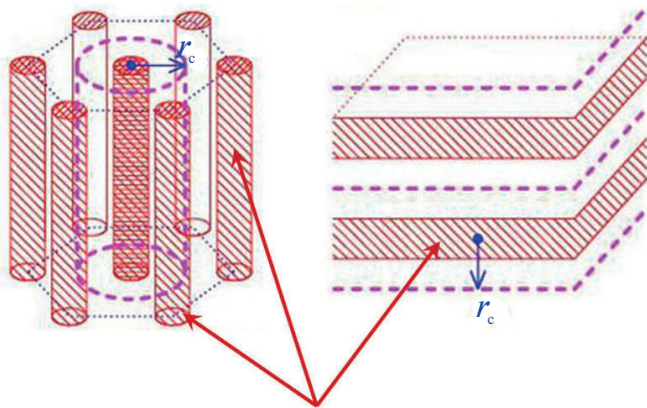
Когда с уменьшением плотности электростатическая энергия ионов и электронная энергия Ферми становятся меньше кинетической энергии ионов, вырожденная кулоновская жидкость превращается в невырожденный газ. Внешняя оболочка звезды, в которой формируется электромагнитный спектр, играет роль фотосферы. Из-за гигантского тяготе-

ния фотосфера изолированной нейтронной звезды имеет толщину всего несколько сантиметров. Присутствие в фотосфере атомов, молекул и ионов, имеющих связанные состояния, существенно изменяет коэффициенты поглощения электромагнитного излучения, а значит, влияет на наблюдаемый спектр.

Химический состав оболочек может быть разным: например, атмосфера может состоять из железа, так как это наиболее стабильный химический элемент, остающийся после взрыва сверхновой. Тем не менее, оболочки могут содержать водород и гелий, принесенные на звезду в результате аккреции. Из-за быстрого разделения ионов в сильном гравитационном поле аккрецированная атмосфера может состоять целиком из водорода. Но если аккреция происходила только на ранней стадии жизни звезды (когда



Сферические атомные ядра



Экзотические атомные ядра

Расположение атомных ядер в коре нейтронной звезды: слева – в объемно-центрированной кубической решетке; справа – в мантии звезды (цилиндрические и плоские ядра) образуются жидкокристаллические структуры. Вектор r_c – радиус объема, приходящегося на одно ядро. Рисунок автора.

температура ее поверхности превышала несколько миллионов градусов), то водород мог продиффундировать в более плотные и горячие области и там сгореть в ходе термоядерных реакций, "оставив" на поверхности гелий. То же может произойти и с гелием, и тогда на поверхности останется углерод. Кроме того, в пульсарах действует механизм ядерного скалывания – дробления тяжелых химических элементов на более "легкие" при столкновениях с частицами, ускоренными в магнитосфере. "Скалывание" приводит к появлению изотопов лития, бериллия и бора, поэтому только в результате исследований можно отве-

тить на вопрос: из какого вещества состоит атмосфера той или иной нейтронной звезды.

В атмосфере нейтронной звезды могут присутствовать атомы, молекулы, а также атомарные и молекулярные ионы, имеющие связанные состояния. Сильные магнитные поля радикально влияют на их свойства. При одной и той же температуре связанные состояния должны быть намного "многочисленнее" в атмосфере звезды с сильным магнитным полем, чем со слабым, потому что в сильном магнитном поле энергии связи ряда состояний намного возрастают, а размеры атомов уменьшаются.

Превращение кулоновской жидкости в газ может быть скачкообразным. Такая возможность возникает при наличии фазового перехода первого рода между конденсированным веществом и невырожденной плазмой; при этом слой вещества в газовой фазе может быть оптически тонким. В последнем случае спектр нейтронной звезды может формироваться на твердой или жидкой поверхности, не "прикрытой" атмосферой. Возможна и ситуация, когда над конденсированной поверхностью находится атмосфера, которая может быть оптически толстой для одних длин волн и прозрачной для других.

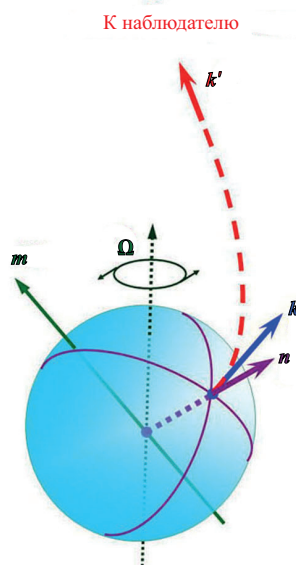
Нейтронная звезда рождается с температурой выше 10^{10} К и затем остывает – сначала быстро, а потом все медленнее, освобождая энергию посредством нейтринного излучения из своих недр и электромагнитного излучения с поверхности. Кора звезды поначалу остается более горячей, чем ядро. Волна охлаждения достигает поверхности звезды примерно через 100 лет, после чего звезда остывает в квазистационарном режиме: распределение температуры в теплоизолирующей оболочке в каждый момент времени однозначно зависит от температуры в ядре. Квазистационарность может нарушаться такими процессами, как взрывное термоядерное горение аккрецированного вещества или выделение энергии в коре при звездотрясениях.

В течение первых тысяч лет (пока ядро звезды еще достаточно горячее) темп остывания "контролируется" процессами, в которых образуются нейтрино и антинейтрино, беспрепятственно "уносящие" энергию в космическое пространство. Главные из них – это урка-процессы (состоят из последовательных бета-распадов и бета-захватов), играющие важную роль в тепловом балансе большин-

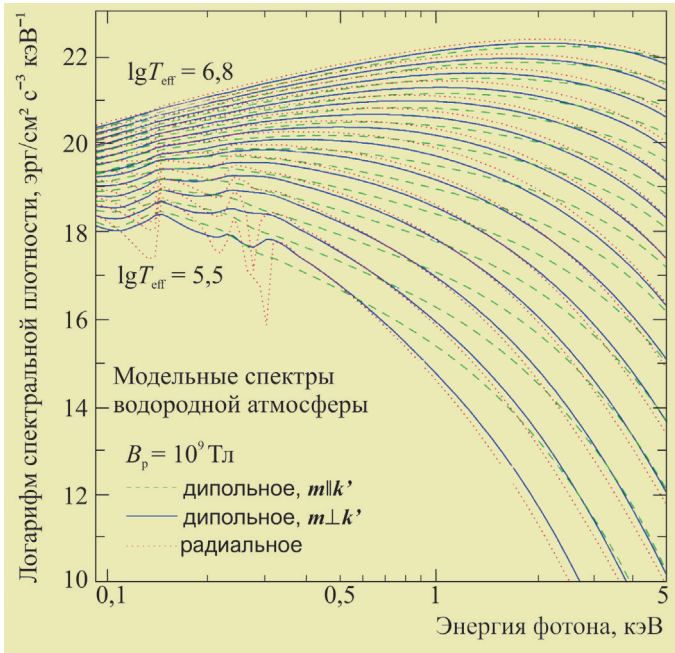
ства звезд. Но в нейтронных звездах (в отличие от обычных) на их интенсивность огромное влияние оказывает концентрация протонов в ядре. Согласно многим современным моделям, в массивных нейтронных звездах концентрация протонов может быть достаточно высока для того, чтобы протекали прямые урка-процессы (то есть такие же, как в обычных, невырожденных звездах). Тогда эти звезды остывают гораздо быстрее, чем звезды с меньшей массой, в которых происходят гораздо более слабые модифицированные урка-процессы (то есть такие, в которых участвует дополнительный нуклон). Поэтому сравнение измеренных масс, возрастов и температур нейтронных звезд с теоретическими кривыми остывания позво-

ляет судить о правдоподобности теоретических моделей вещества, которые предсказывают ту или иную зависимость концентрации протонов от плотности.

Кроме процессов остывания, в нейтронной звезде "действуют" различные процессы нагрева, например, нагрев полярных шапок пульсаров магнитосферными токами; выделение энергии при аккреции; процессы, связанные с эволюцией магнитного поля; реакции между элементарными частицами, спровоцированные изменением химического равновесия при уменьшении центробежных сил из-за замедления вращения звезды (ротохимические реакции). У некоторых нейтронных звезд зарегистрированы намного более высокие тепловые светимости, чем предсказывает теория остывания. В таких звездах должны "работать" мощные процессы внутреннего нагрева; особенно это характерно для магнитаров.



Формирование спектра нейтронной звезды с сильным магнитным полем. Магнитная ось m , ось вращения Ω и направление на наблюдателя в общем случае различаются, вследствие искривления лучей и гравитационного красного смещения; волновой вектор испущенного фотона k отличается от волнового вектора k' фотона, "приходящего" к наблюдателю. Рисунок автора.



Тепловые спектры нейтронной звезды (T_{eff}) с сильным магнитным полем и водородной атмосферой. В случае дипольного поля спектр меняется при вращении звезды. Спектральные особенности обусловлены квантовыми переходами в атомах водорода, энергии которых "сдвинуты" в рентгеновскую область из-за сильного магнитного поля. Рисунок автора, по данным W.C.G. Ho et al., 2008, ApJS. 178, 102.

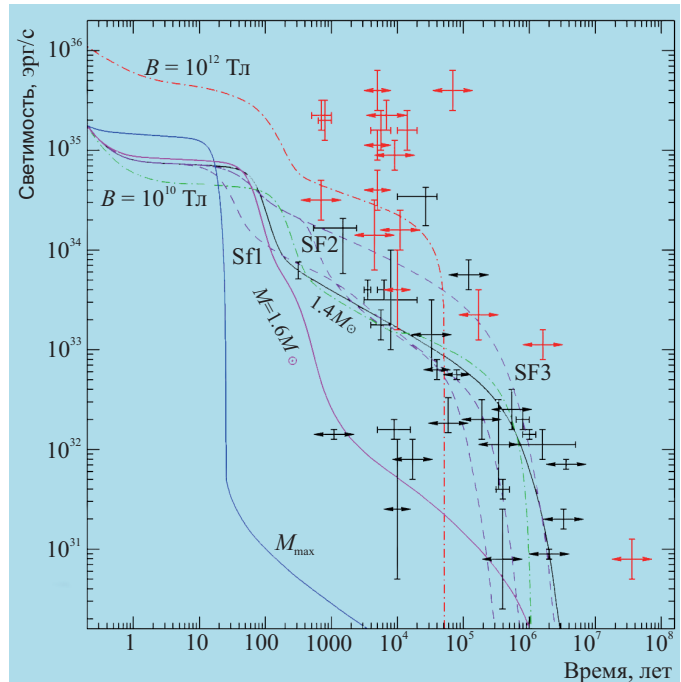
МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Как мы отмечали выше, большинство известных нейтронных звезд обладают сильными магнитными полями. Предлагались различные теоретические модели

генерации поля при взрыве и коллапсе сверхновой или в молодых нейтронных звезд-

дах: рассматривались такие явления, как дифференциальное вращение, конвекция, магниторотационная неустойчивость и термомагнитные эффекты.

График остывания нейтронных звезд: теория и наблюдения (черные отрезки погрешностей – для обычных нейтронных звезд, красные – для магнитаров). Сплошные кривые – немагнитные нейтронные звезды разной массы без учета барионной сверхтекучести; штриховые кривые – для трех моделей сверхтекучести (SF1, SF2, SF3); штрихпунктирные кривые – для двух значений сверхсильного магнитного поля. Рисунок автора (по данным A.Y. Potekhin and G. Chabrier, 2018. A&A 609, A74).

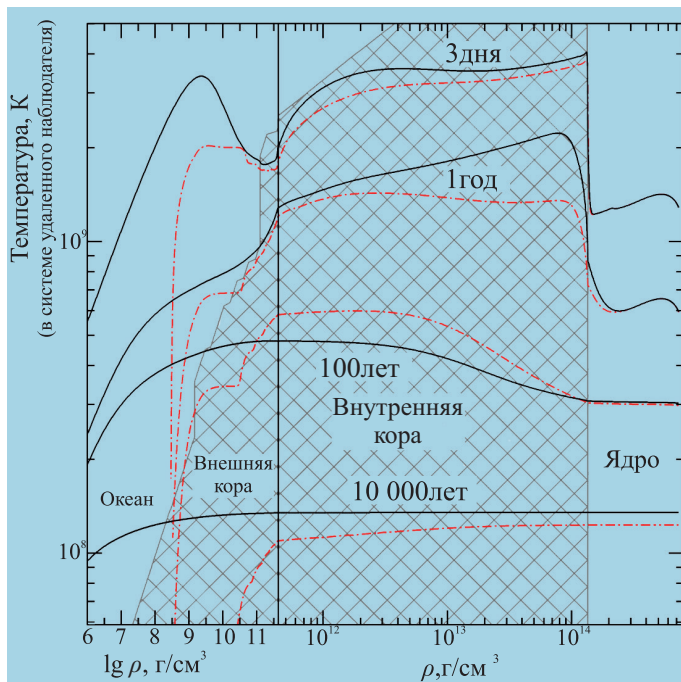


Графики распределения температуры, в зависимости от плотности ρ , внутри обычных остывающих нейтронных звезд (черные сплошные кривые) и магнитаров с конденсированной поверхностью при $B = 10^{12}$ Тл (красные штрихпунктирные кривые) для разных возрастов. Заштрихованная область соответствует твердой коре.

Рисунок автора (по данным A.Y. Potekhin and G. Chabrier, 2018. A&A 609, A74).

Электрические токи, "поддерживающие" магнитное поле звезды, могут протекать либо во внутренней коре, либо в ядре звезды: то есть там, где электропроводность достаточно высока, для того чтобы поле не "распалось" в течение времени, сопоставимого с возрастом известных пульсаров. Если магнитное поле имеет источник в ядре звезды, то сверхпроводимость протонов должна приводить к образованию магнитных трубок – вихрей Абрикосова, имеющих микроскопические поперечные размеры. В процессе эволюции нейтронной звезды ее магнитное поле меняется в зависимости от многих факторов и взаимосвязанных физических процессов.

В сверхсильном поле становятся важны специфические эффекты квантовой электродинамики – такие, как поляризация электрон-позитронного ваку-



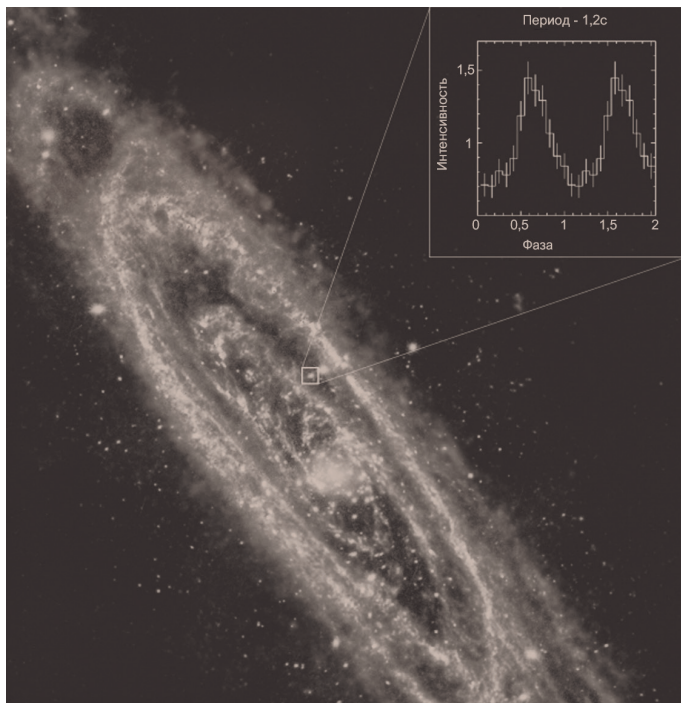
ума. При этом вакуум приобретает свойства двулучепреломляющей среды – среды, в которой коэффициент преломления зависит от поляризации, что существенно влияет на спектр и особенно на поляризацию наблюдаемого излучения нейтронной звезды.

Итак, нейтронные звезды – настоящий "кладезь" экстремальных состояний вещества. В них переплетены загадки природы, относящиеся, казалось бы, к далеким друг от друга областям – физике космоса и микромира, гигантских гравитирующих масс и элементарных частиц. В последние полвека, прошедшие после открытия

нейтронных звезд, их теория и наблюдения развиваются быстрыми и все ускоряющимися темпами. Это обусловлено как успехами теоретической и экспериментальной физики, так и впечатляющим прогрессом наблюдательной астрономии и теоретической астрофизики. В обозримом будущем появятся новые инструменты – такие, как проектируемые сейчас космические обсерватории, обладающие возможностью проведения рентгеновской поляриметрии. Несомненно, они позволят совершить очередной качественный скачок в понимании нейтронных звезд, и, как следствие, – в развитии фундаментальной физики.

Нейтронная звезда в Туманности Андромеды

В рамках проекта EXTRaS (Exploring the X-ray Transient and variable Sky – исследование рентгеновского транзиентного и переменного неба) ведется систематическая обработка данных, полученных с помощью космической обсерватории "XMM-Newton" (ESA). В марте 2018 г. в соседней галактике Туманность Андромеды (M31; 2,52 млн св. лет от нас) был обнаружен источник рентгеновского излучения 3XMM J004301.4+413017. По одной версии – это быстро вращающаяся, с амплитудой 1,2 секунды, нейтронная звезда – пекулярный двойной рентгеновский пульсар, в котором ее компаньон менее массивен, чем Солнце. Нейтронная звезда "питается" соседней звездой, которая вращается вокруг нее каждые 1,3 сут. По другой версии, эта система может быть бинарной, со средней массой, в которой компаньон в два раза массивнее Солнца. Астрономам потребуется провести дополнительные исследования за пульсаром и его компаньоном для того, чтобы определить, какая модель более вероятна. В нашей Галактике есть такого класса объекты, но,



Фрагмент спиральной галактики Туманность Андромеды; указано место, где обнаружена нейтронная звезда. Справа вверху представлен график, который "демонстрирует" кривую светимости источника 3XMM J004301.4+413017. Синтезированный снимок создан в 2016 г. по данным, полученным с помощью космических обсерваторий "XMM-Newton" и "Гершель". Фото ESA/ Herschel/ PACS/SPIRE/J. Fritz/XMM-Newton/EPIC/W. Pietsch.

как и в Туманности Андромеды, их обнаружить до сих пор не удавалось.

Ученые из Института астрофизики пространства и физики космоса (Италия) использовали архивные данные и снимки обсерватории "XMM-Newton". С 2000 по 2010 гг. с помощью камеры EPIC в энергетических диапазонах 0,3–7,0 кэВ, соответствующих длинам 1,8–41,3Å, было произведено несколько десят-

ков наблюдений областей этой галактики с экспозицией больше чем 2 млн секунд (эквивалентных более чем 20 сут). В результате синтеза изображений, полученных обсерваториями "Гершель" и "XMM-Newton" (см. стр. 1 обложки), можно проследить эволюцию звезд в галактике Андромеды.

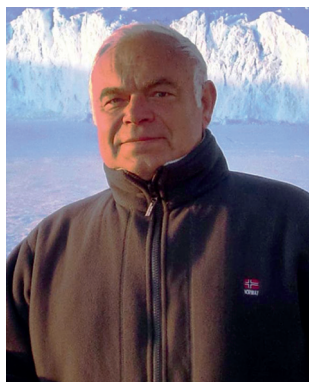
*Пресс-релиз ESA,
31 марта 2018 г.*

Зонды для исследования ледяных щитов Земли и других небесных тел

А.В. ЗЕЛЕНЧУК,
кандидат технических наук

В.А. КРЫЛЕНКОВ,
доктор биологических наук

В.А. ЗЕЛЕНЧУК,
инженер-конструктор
"Научно-техническая фирма "СВИТ", Москва



Авторами статьи предложена технология увеличения скорости термического бурения льда под воздействием гидравлической силы, генерируемой термобуром. Она позволяет повысить ко-

эффициент преобразования тепловой энергии в энергию плавления льда и безопасно увеличить мощность термобура. Авторы представили также принципиальные конструкции и схемы работы

термического гидравлического бурового зонда для исследования толщи льдов и подледниковых водных сред на Земле, на крупных спутниках Юпитера и Сатурна, покрытых ледяными "щитами".

ЗАЧЕМ ИССЛЕДОВАТЬ ЛЕДЯНЫЕ ЩИТЫ ПЛАНЕТ?

Изучение ледяных щитов, подледниковых водных сред и донных отложений в Арктике и Антарктике, поиск признаков жизни в экстремальных условиях, хронологических горизонтов, содержащих геологическую летопись о палеоклиматических изменениях, происходивших в прошедшие геологические эпохи, позволит расшифровать уникальную информацию об эволюции Земли и других планет. Эти знания необходимы для понимания процессов глобального потепления климата, а также для прогноза природных катастроф в целях обеспечения безопасной среды обитания людей на нашей планете.

Существование криосферы, как полагают ученые, типично не только для Земли, но и для спутников Юпитера (Ганимед, Каллисто и Европа) и Сатурна (Диона, Энцелад), для полюсов Марса. Создание и применение зондов для экологически безопасных исследований озера Восток в Антарктиде позволило бы астробиологам уже на Земле многое узнать о свойствах и эволюции хо-

лодных миров Солнечной системы. Перед отправкой таких зондов, например, на спутник Юпитера Европу (где толщина льда достигает 30 км, а глубина подледного океана – до 100 км), необходимо провести их испытания в

районе российской станции "Восток", где расположено подледниковое реликтовое озеро Восток, покрытое льдом толщиной до 4 км, которое было изолировано от окружающей среды на протяжении 15 млн лет.

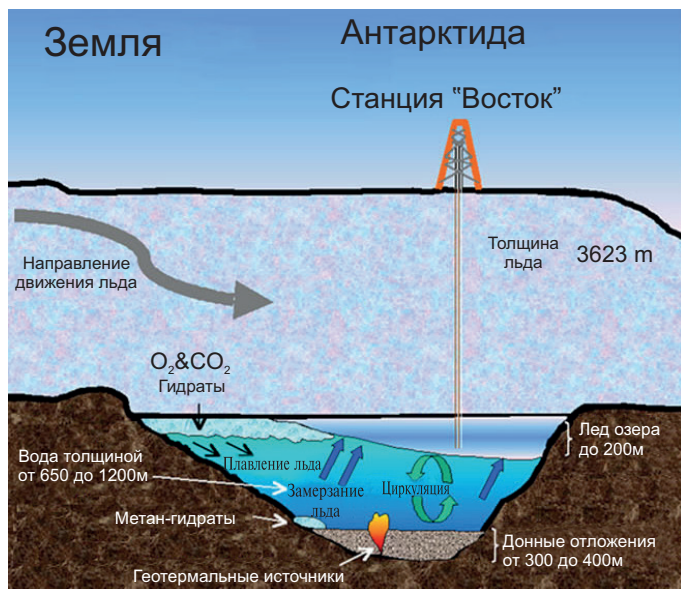


Схема разреза толстых льдов и подледниковых сред на Земле и на спутнике Юпитера Европе. Рисунок NASA/JPL-Caltech.

Ученые надеются обнаружить следы жизни в глубинах озера Восток, но опасаются, что в результате негерметичного доступа в подледниковое озеро – через открытые скважины во льду – могут быть нарушены режимы термобарического равновесия и фазового перехода по всей поверхности раздела лед–вода, что неизбежно приведет к загрязнению и нарушению экологии реликтового озера.

Требование экологически чистого доступа к подледниковым средам сопряжено со значительными инженерными и материально-техническими проблемами, причем в настоящее время есть лишь два примера глубинного (до 4 км) бурения льда с открытым доступом к подледниковой среде: с помощью механического бура (колонковое бурение с отбором керна), с использованием технологий термического проплавления при гидродинамическом бурении льда.

Классические электромеханические буровые установки громоздки, энергоемки, их эксплуатация сопряжена с большими трудовыми и

транспортными затратами; причем скважина глубиной более 500 м должна быть заполнена незамерзающей буровой жидкостью для предотвращения деформации ее стенок под действием горного давления во льду. Токсичная буровая жидкость влияет на качество ледяных кернов и проб, извлекаемых из глубин, и может попасть в водную среду подледникового озера. Тем не менее за более чем 20 лет из сверхглубокой скважины на станции "Восток" с помощью колонковых буров добыты тысячи кернов льда, изучение которых дало уникальную информацию о палеоклиматических изменениях, происходивших на Земле в течение сотен тысяч лет (Земля и Вселенная, 2017, № 2). Единственные пока образцы озерной воды, добытые российскими учеными в результате гидроразрыва нижней части скважины и/или путем бурения (при повторном проникновении в озеро), оказались непригодными для биологического (клеточно-молекулярного) анализа, так как подвергались воздействию бурового раствора¹. К сожалению, в кернах надозерного льда, где присутствуют следы буровой жидкости, сложно выявить уникальные организмы. Кроме того, признаки жизни в озере Восток

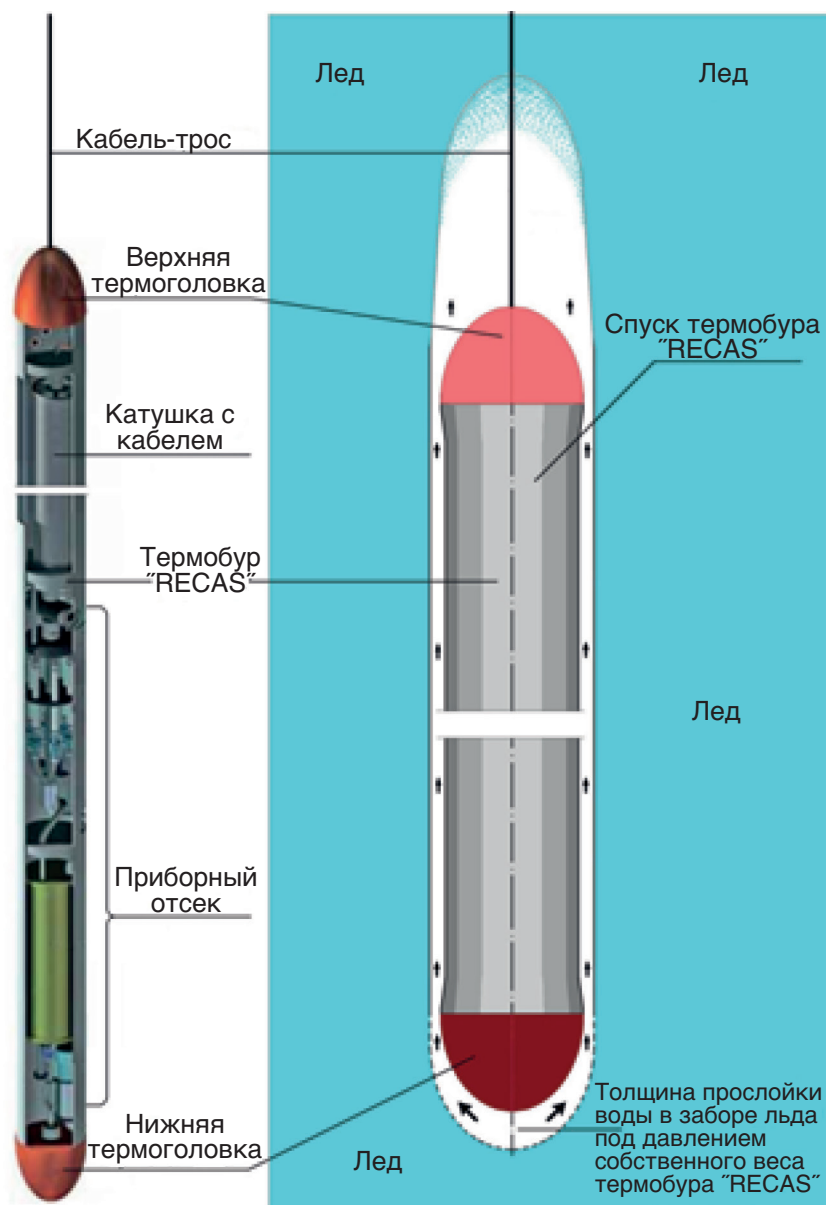
(если она существует), скорее всего, следует искать ближе к его дну, которого можно достигнуть при разработке и применении новых технологий и зондов для герметичных подледниковых исследований.

Проплавление толщи льда способом гидродинамического бурения (проплавление льда горячей водой; Clean Hot Water Drills, CHWD) имеет большую скорость проходки, но неэффективно из-за больших потерь тепла. Кроме того, обустроенная таким способом скважина доступна для изучения подледной среды с помощью различных зондов и приборов не более 24 ч – пока она не замрзнет, что является существенным недостатком CHWD-технологии².

Громоздкие буровые установки с колонковыми бурами и комплексы с использованием горячей воды, вес которых исчисляется сотнями тонн, а энергетические затраты превышают 5 МВт, не позволяют организовать системные исследования толстых льдов (т.н. ледяных щитов) и подледниковых водных сред в полярных труднодоступных регионах. Следует учитывать, что любой доступ к изолированным озерам через открытые скважины изменит режимы

¹*Bulat S.A.* Microbiology of the subglacial Lake Vostok: first results of borehole-frozen lake water analysis and prospects for searching for lake inhabitants //Phil. Trans. R. Soc. A, 2016. T. 374. №. 2059. C. 20140292.

²*Makinson K. et al.* Clean subglacial access: prospects for future deep hot-water drilling //Phil. Trans. R. Soc. A, 2016. T. 374. №. 2059. C. 20140304.



Термобур "RECAS" проплавляет лед под давлением собственного веса. Показана водяная прослойка между льдом и термоголовкой "RECAS". Рисунок авторов статьи.

термобарического равновесия и фазового перехода по всей поверхности раздела лед-вода, что нарушит экологию реликтовых

озер. Поэтому необходимо создавать мобильные автономные зонды, которые позволили бы герметично проникать в подледниковые

среды, были бы в десятки раз дешевле и были способны быстрее и точнее определять наиболее интересные места для дальнейших

детальных исследований льдов как на Земле, так и на других планетах.

ЗОНДЫ ДЛЯ ГЕРМЕТИЧНОГО ПРОНИКНОВЕНИЯ В ПОДЛЕДНИКОВУЮ СРЕДУ

В недавней публикации приведены сведения о разработке "RECAST" (Recoverable autonomous sonde – извлекаемый автономный зонд) для термического бурения (проплавления) льда³. Зонд "RECAST" оснащен двумя термоголовками на торцах его корпуса, внутри него размещены приборный отсек и катушка с несущим кабелем, причем последний соединен с электрогенератором и пультом управления на ледяной поверхности. По мнению разработчиков, такое устройство позволит отбирать пробы талой воды изо льда и водной среды озера, проводить их анализ, "оставаясь в изоляции" от поверхности льда.

В то время как нижняя термоголовка плавит лед, "RECAST" под действием собственной силы тяжести (десятки килограммов) движется вниз, а несущий (движущийся) кабель выходит через небольшое центральное отверстие в верхней термоголовке. Талая вода в

скважине выше зонда быстро замерзает и "охватывает" неподвижный кабель, обеспечивая тем самым ледяную изоляцию зонда и подледниковой среды от поверхности ледника. Таким образом, устройство движется сквозь лед внутри герметичного кокона, заполненного талой водой. Для того, чтобы поднять зонд, несущий кабель с усилием, создаваемым электромеханическим приводом, его наматывают на катушку, находящуюся внутри зонда, а верхняя термоголовка плавит лед. Сила, с которой зонд давит на ледяной забой, определяется силой натяжения кабеля. Талая вода ниже зонда в скважине быстро замерзает, обеспечивая ледяную изоляцию подледниковой среды.

Этот зонд, диаметром 150 мм и длиной 4 м, оснащен электрогенератором мощностью 9–10 кВт, причем ожидаемая скорость его движения в толще (матрице) льда может достигнуть 1,7 м/ч.

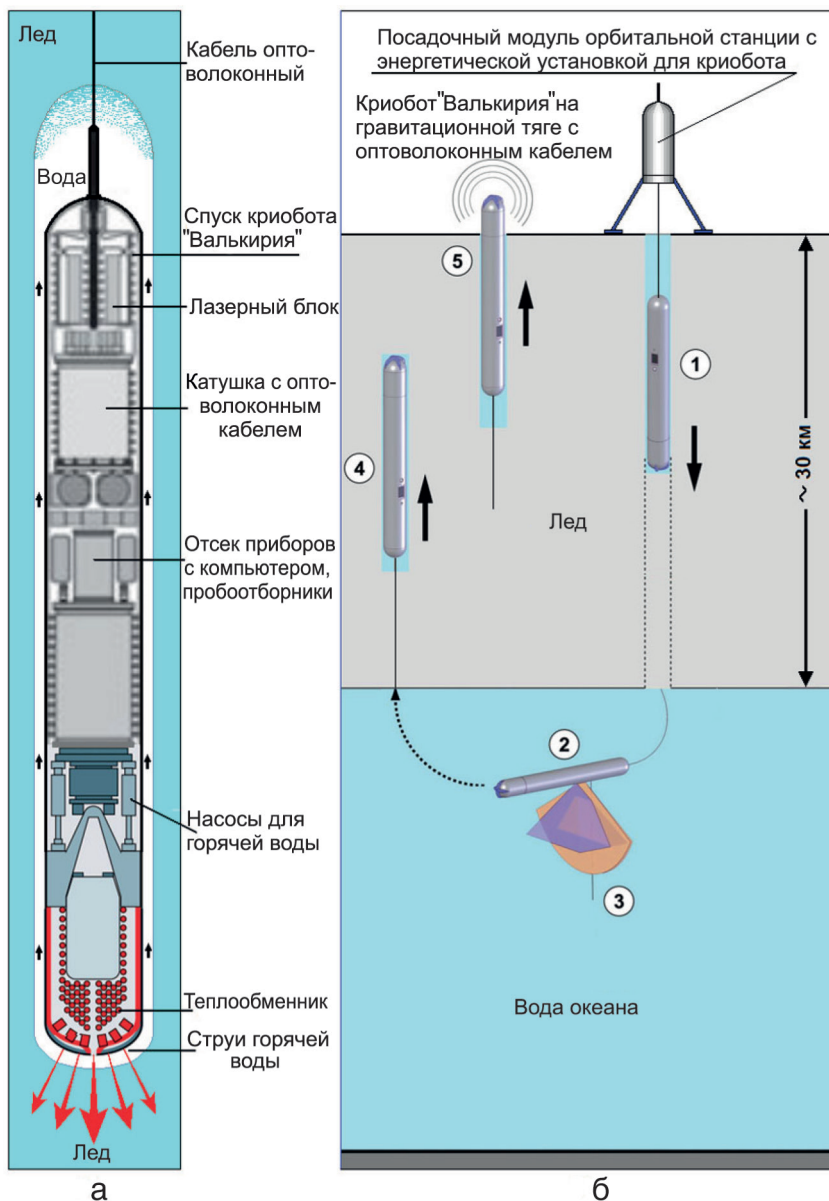
По оценкам разработчиков, цикл исследований льда с помощью такого зонда на глубинах до 5 км потребует 8–9 месяцев при расходе не менее 12 т топлива и наличия небольшого штата (4–5 специа-

листов) для управления и обеспечения "RECAST", что в 10–20 раз дешевле, чем применение электромеханического бурения или бурения горячей водой. Однако, его использование все же потребует много времени и топлива, что не позволит провести полный цикл исследований в период сезонных работ в Арктике и Антарктике (за 2–3 месяца). Кроме того, большая механическая нагрузка на несущий кабель при подъеме может привести к его обрыву и потере зонда.

Главным недостатком термических буров типа "RECAST", проплавливающих толщу льда под давлением собственного веса, является малая скорость бурения вследствие большого термического сопротивления водяной прослойки в ледяном забое (между льдом и термоголовкой). Ток талой воды снаружи корпуса зонда, направленный против движения "RECAST", дополнительно уменьшает скорость движения устройства и увеличивает потери тепла через боковые стенки ледяной скважины.

Простое повышение мощности термоголовки, направленное на увеличение скорости бурения льда, может привести к парообразованию, что снизит

³Talalay P.G. et al. Recoverable autonomous sonde (RECAST) for environmental exploration of Antarctic subglacial lakes: general concept // Annals of Glaciology, 2014. V. 55 (65). P. 23–30.



Проект эксплуатации криобота "Валькирия" фирмы "Stone Aerospace" – исследование льда и водной среды на спутнике Юпитера Европе: а – при бурении льда вниз; б – этапы работ криобота (1 – спуск через лед, 2 – поворот в воде и проход 1 км подо льдом, 3 – съемки рельефа дна боковым эхолотом, 4 – поворот в воде и подъем сквозь лед, 5 – выход на поверхность льда). Рисунок NASA.

теплоотдачу в ледяной забой, а термоголовка-нагреватель может перегореть.

Поэтому для безопасного увеличения мощности термоголовки, и, соответствен-

но, скорости бурения, следует увеличить теплоотдачу от нагревателя в толщу льда.

В США геолог Питер Доран и основатель аэрокосмической инженерной фирмы "Stone Aerospace" (США) Билл Стоун собрали команду. В нее вошли исследователи полярных регионов и планет, которые разрабатывают роботизированный комплекс-криобот "Валькирия" ("Valkirie") для поиска жизни в подледниковых озерах в Антарктиде и на планетах Солнечной системы. В ближайшие 20 лет специалисты "Stone Aerospace" при финансовой поддержке NASA планируют доставить с помощью космического аппарата – криобота "Валькирия" – со штатным источником электроэнергии – (ядерная установка) на спутник Юпитера Европу для исследования льда толщиной до 30 км и подледного океана с глубинами до 100 км⁴.

Криобот "Валькирия" отличается от термобуров, проплавляющих с помощью термоголовки лед под давлением собственного веса тем, что он испускает струи горячей воды в ледяной забой. Предполагается, что криобот будет потреблять энергию, генерируемую с помощью лазера мощностью 250 кВт, питаемого от источника с ядерным топливом, рас-

положенного на ледяной поверхности Европы. Для "доставки энергии" лазера к криоботу предполагается использовать оптическое волокно – кабель толщиной в несколько микрон, который намотан на катушку, размещенную в корпусе криобота. При испытаниях на Аляске макет такого криобота длиной 1,6 м, диаметром 0,45 м и мощностью в 5 кВт "пробурил" лед, достигнув глубины 30 м при скорости проходки примерно 1 м/ч.

Поскольку лед на поверхности Европы имеет температуру в диапазоне от –160° до –220° С, то талая вода, образовавшаяся при термическом бурении, будет быстро замерзать над верхним торцом корпуса криобота, вмораживая в скважину несущий кабель, соединяющий криобот с источником энергии на поверхности. В толще льда, в пределах скважины с водой, криобот будет бурить лед горячей водой, прижимаясь внизу к ледяному забою силой тяжести собственного веса. Однако следует учесть, что на спутнике Юпитера сила тяготения в 10 раз меньше, чем на Земле, поэтому бурение льда под давлением, равным небольшой силе тяжести самого криобота, на Европе может обернуться потерями до

90% тепла через боковые поверхности (стенки) скважины, а скорость бурения льда может оказаться значительно ниже, чем на Земле, то есть меньше 1 м/ч. На такое бурение льда (вниз и вверх) толщиной 30 км на Европе потребуется более 8 лет.

Понимая, что затраты энергии на плавление льда пропорциональны квадрату диаметра ледяного забоя, специалисты "Stone Aerospace" решили уменьшить диаметр корпуса криобота с 0,45 м до 0,25 м при общей его длине 2,8 м. Причем следует заметить, что дальнейшее уменьшение диаметра этого зонда невозможно из-за физико-технических свойств оптоволоконного кабеля, намотанного на катушку внутри корпуса криобота. Кабель имеет ограничения по радиусу изгиба и пределу передаваемой мощности в оптическом кварцевом волокне, а также в размерах специальных лазерных модулей, предотвращающих плавление кварцевых блоков внутри криобота. Результаты полевых испытаний макета криобота на стальном несущем кабеле, которые планировались на Аляске в 2015 г., авторам данной статьи не известны.

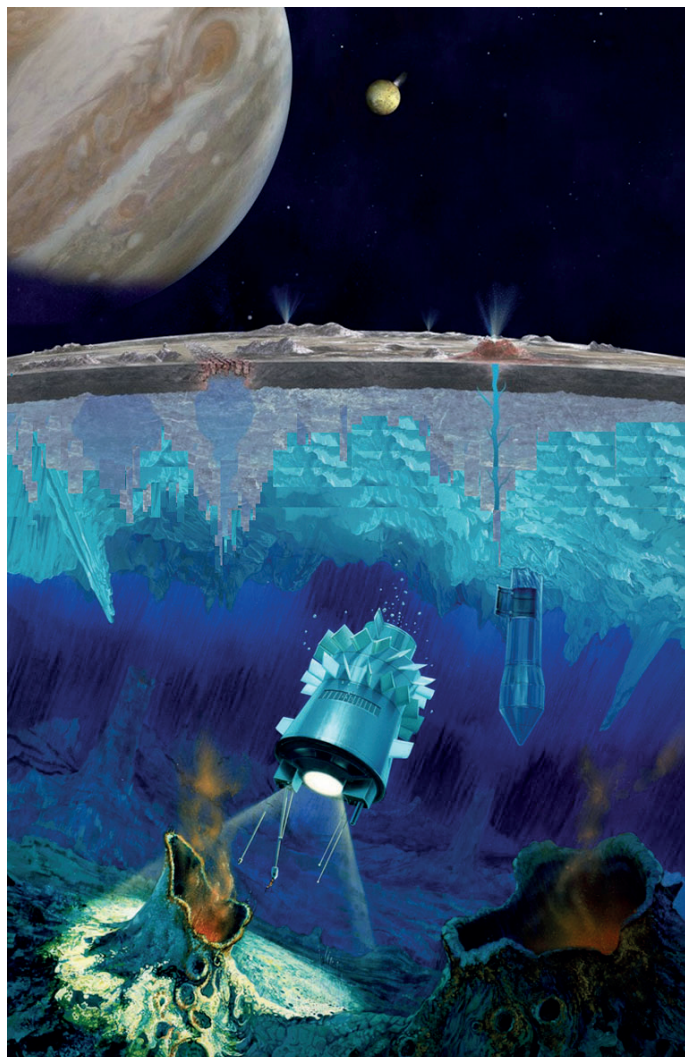
Разработчики "Stone Aerospace" предложили схему спуска криобота сквозь

⁴Stone W.C., Hogan B., Siegel V., Lelievre S., Flesher C. Progress towards an optically powered cryobot // *Annals of Glaciology*. 2014. V. 55 (65). С. 1–13.

*Криобот "Валькирия" проби-
вается через ледяную кору
спутника Юпитера Европы и
выпускает гидрозонд для ис-
следования подледного океа-
на. Рисунок NASA.*

30-км толщю льда в под-
ледный океан (см. рис. на
стр. 52; спуск вниз, пози-
ция 1). После проникнове-
ния в водную среду пла-
нируется изменить центр
тяжести и плавучесть крио-
бота так, чтобы в гори-
зонтальном положении он
был бы способен проплыть
подо льдом 1 км и с по-
мощью бокового эхолота
провести батиметрическую
съемку рельефа дна океа-
на (там же; позиции 2 и 3).
Затем, еще раз изменяя
центр тяжести и увеличи-
вая плавучесть, планиру-
ется развернуть криобот
термоголовкой вверх и
проплавливать лед, подни-
маясь к поверхности сквозь
ледяную толщю в 30 км
(позиция 4). При этом сила
давления в ледяной забой
определяется разностью
между подъемной силой
Архимеда и силой тяжести
криобота на спутнике Юпи-
тера. По оценке специали-
стов, скорости подъема и спу-
ска криобота в толще льда
будут соизмеримы, а место
выхода криобота на поверх-
ность Европы определяют по
радиомаяку (позиция 5).

Разработчики криобота
"Валькирия" надеются, что
в ближайшем десятилетии
они решат проблему пере-



дачи энергии мощностью
250 кВт через оптоволокон-
ный кабель длиной 60 км,
что обеспечит проникнове-
ние исследовательского
зонда сквозь многокиломе-
тровые льды Европы.

Для изучения водной сре-
ды подледного океана спут-
ника Юпитера после про-
никновения криобота через
толщю льда в 30 км из кор-
пуса «Валькирии» планиру-
ется выпустить в воду ком-

пактный робот-гидрозонд.

Общим и главным не-
достатком термических
буров "RECAS" и "Вальки-
рия", проплавливающих толщю
льда под давлением собс-
твенного веса, является
малая скорость бурения
из-за большого термическо-
го сопротивления водяной
прослойки в забое между
льдом и термоголовкой,
что весьма снижает перс-
пективы их применения для

бурения толстых льдов. Например, за время одного исследования с помощью этих зондов (от 1 до 8 лет) изгибы и сдвиги даже относительно стабильных и толстых ледовых покровов могут повредить несущий кабель, что приведет к потере этих устройств. Многочисленные попытки увеличить скорость бурения, оптимизируя формы и режимы работы термоголовок, не привели к перспективным конструкторским решениям. Возможности конструкций "RECAS" и "Валькирии" оказались исчерпанными, и возникла необходимость в новых идеях.

ПРИНЦИПЫ СКОРОСТНОГО БУРЕНИЯ ЛЬДОВ

С целью безопасного увеличения мощности термоголовки и скорости движения термобура необходимо снизить термическое сопротивление прослойки талой воды в ледяном забое за счет создания дополнительной силы, воздействующей на термобур. На больших глубинах, недостижимых для прямого силового воздействия на термобур-зонд с ледо-

вой поверхности, авторы этой статьи предлагают использовать гидравлическую силу, которая может быть создана за счет перепада давления воды на концах (торцах) зонда⁵.

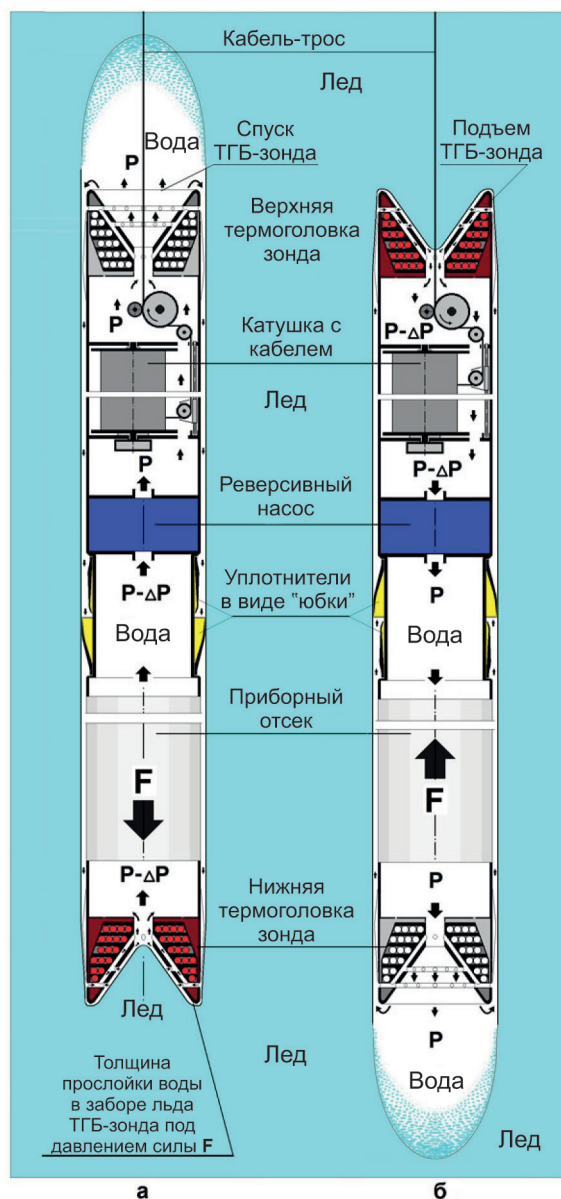
Авторы предлагают проект термического гидравлического бурового зонда (ТГБ-зонд) для исследования толстых льдов и подледниковых водных сред. Верхний и нижний торцы трубчатого корпуса ТГБ-зонда оснащены термоголовками в виде воронок с каналами, предназначенными для перекачки талой воды сквозь корпус зонда. В отличие от параболических термоголовок их воронкообразная форма удобна для откачивания талой воды из ледяного забоя через зонд; причем такая их форма позволяет фокусировать тепловое излучение в центре ледяного забоя и уменьшать потери тепла через боковые поверхности скважины. В корпусе зонда размещены реверсивные гидронасос и привод катушки с несущим кабелем, который "выводится" за пределы зонда через отверстие в верхней термоголовке. Над

нижней термоголовкой размещается приборный отсек зонда с приводами для взятия проб слоев воды и донного грунта. Для передачи энергии и информации предусмотрен способ контактного (или бесконтактного) съема электроэнергии с несущего кабеля. В углубления по периметру внешнего корпуса ТГБ-зонда вмонтированы пары разнонаправленных уплотнителей в виде "юбок"⁶.

Когда зонд движется вниз, включается нагрев нижней термоголовки, а из ледяного забоя с помощью насоса талая вода откачивается сквозь зонд в верхнюю (над его корпусом) часть скважины. В зоне ледяного забоя создается разрежение в системе водная среда – лед, под действием которого возникает обратный ток талой воды через зазор между ледяной стенкой скважины и внешним корпусом зонда. Под напором обратного тока воды раскрывается "юбка" уплотнителя, "края" которой плотно прижимаются к стенкам скважины и перекрывают поток талой воды. "Юбка" соседнего уплотнителя,

⁵Зеленчук А.В., Зеленчук В.А., Крыленков В.А. Термогидробур для изучения льдов, ледников и подледниковых озер // Сб. трудов II Международной научно-практической конференции «Природная среда Антарктики: современное состояние изученности». Беларусь, Нарочь, 2016. С. 137–142.

⁶Зеленчук А.В., Крыленков В.А., Гилева В.Г., Зеленчук В.А., Абакумов Е.В. Устройство для отбора проб компонентов живых систем в ледниковых и подледниковых отложениях. Патент России № 131409 от 25.10.2012.



Эскизный проект использования ТГБ-зонда для исследования толстых льдов и подледниковых озер без нарушения их ледяной изоляции: а – при спуске в толщу льда под давлением гидравлической силы; б – бурение льда вверх под воздействием подъемной силы. Рисунок авторов.

лы. Отличие состоит в том, что сила F возникает за счет понижения давления на ΔP (возникающего перед зондом) путем откачивания насосом талой воды из ледяного забоя. Значение силы F можно вычислить в соответствии с законом Паскаля; умножая величину перепада давления ΔP , создаваемого насосом, на площадь поперечного сечения зонда S . Например, при величине перепада давления ΔP в 10 и 20 атм и диаметре зонда 10 см возникающая гидравлическая сила F составит около 800 кгс и 1600 кгс, соответственно, что может превысить вес зонда в 20–100 раз. Наибольшей величины давления на ТГБ-зонд гидравлическая сила F достигает в глубинах, где давление воды P в скважине превышает перепад давления ΔP , создаваемого гидронасосом. При погружении зонда в лед на глубину в несколько десятков метров скорость его движения соизмерима со скоростями обычных термобуров, достигаемыми под воздействием собственного веса. Но на больших глубинах, где

наоборот, складывается и прижимается к корпусу зонда. В результате возникает перепад давления ΔP в поперечном сечении S зонда и сила F , которая давит на ТГБ-зонд, уменьшая прослойку воды в забое, что увеличивает те-

плоотдачу термоголовки и скорость движения зонда. Предлагаемый принцип движения зонда в ледяной толще (внутри скважины) напоминает движение капсулы в трубе пневмопочты, работающей за счет перепада давления на концах капсу-

величина давления талой воды равна или больше ΔP насоса, скорость движения ТГБ-зонда можно повысить в несколько раз путем увеличения мощности как насоса, так и термоголовки.

Для движения к ледовой поверхности включают верхнюю термоголовку, талую воду из ледяного забоя откачивают насосом сквозь зонд в нижнюю часть скважины. Направленная вверх сила F позволяет эффективно плавить лед, поскольку она многократно превышает вес самого ТГБ-зонда в гравитационном поле. Такая гидравлическая сила (тяга) позволит ТГБ-зонду самостоятельно "подниматься" на поверхность льда, практически не нагружая несущий кабель, что невозможно реализовать при использовании "RECA". При этом сохраняется ледяная изоляция самого ТГБ-зонда как от поверхности льда, так и от подледниковой среды (причем вмерзший в лед кабель выполняет функцию устройства, направляющего движение зонда к ледовой поверхности). Использование для подъема зонда гидравлической тяги вместо троса значительно снижает прочностные требования к самому несущему кабелю,

что позволяет применить компактную энергосберегающую однопроводную систему Тесла для электропитания и телеуправления ТГБ-зондом^{7,8,9}.

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДЯНЫХ ШИТОВ С ПОМОЩЬЮ ТГБ-ЗОНДОВ

Отметим, что ТГБ-зонды не предназначены для исследования подвижных льдов и ледников с большими трещинами, полостями и рыхлой структурой – с такими исследованиями на Земле вполне справятся обычные термобуры с прочным кабелем, через открытые скважины глубиной до 500 м.

ТГБ-зонды предназначены для исследований малоподвижных толстых льдов и подледниковых сред на глубинах до 5 км на Земле, на Марсе или на спутниках Юпитера и Сатурна (до 40 км), которые могут длиться месяцами, а то и годами.

Для снижения затрат энергии и времени на плавление льда глубинные зонды должны иметь минимально возможную площадь сечения S , а несущий кабель должен быть достаточно

гибким и прочным, иметь малый вес и минимальные потери энергии во время движения зонда внутри толщи льда.

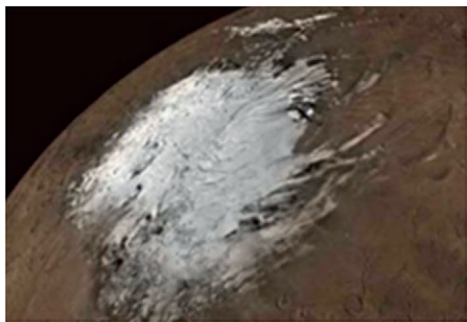
Из-за малых размеров ТГБ-зонда придется свести к минимуму объемы проб талой воды с различных горизонтов ледяной толщи, водной среды и донных отложений озера, которые необходимо доставить в лабораторию для исследований. Традиционный отбор кернов льда целесообразно заменить фильтрацией талой воды из тонких каверн большой площади, размываемых зондом вокруг ледяной скважины. Чем больше площадь размываемой каверны, тем больше плотность оседающих на фильтры частиц и микроорганизмов из исследуемого горизонта. Такой "фильтрационный" способ отбора проб воды на стерильные компактные и легкие фильтры снизит вероятность стратиграфической ошибки определения состава и возраста проб, облегчит их доставку на поверхность для проведения физико-химических и микробиологических анализов в лабораторных условиях.

В выбранной схеме ТГБ-зонда авторами предложено использовать однопро-

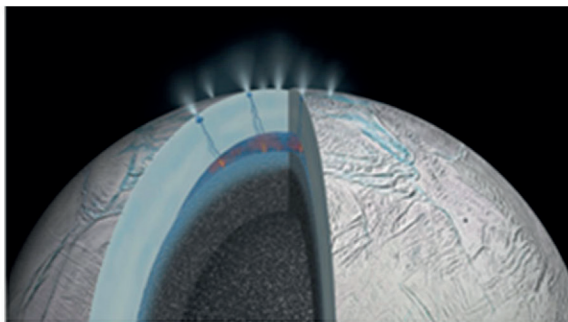
⁷Кадомская К.П., Кандаков С.А., Лебедев Д.М. Об однопроводной системе передачи силовой электрической энергии // Сб. научных трудов НГТУ, 2011. № 2 (64). С. 123–134.

⁸Bank M., Haridim M., Tsingouz V., Ibragimov Z. Highly effective handset antenna // Int'l.J. of Communications, 2012. 6 (2). P. 80–87.

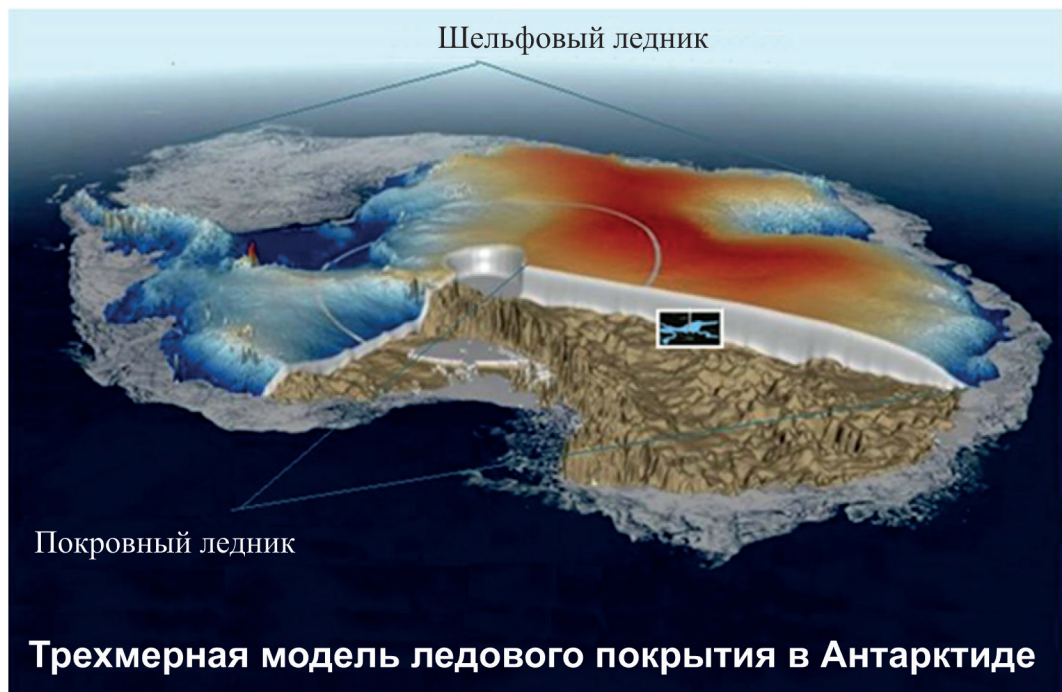
⁹Стребков Д.С., Некрасов А.И. Резонансные методы передачи и применения электрической энергии // Изд. 4-е, перераб. и доп. / М.: ГНУ ВИЭСХ, 2013. 584 с.



а



б



в

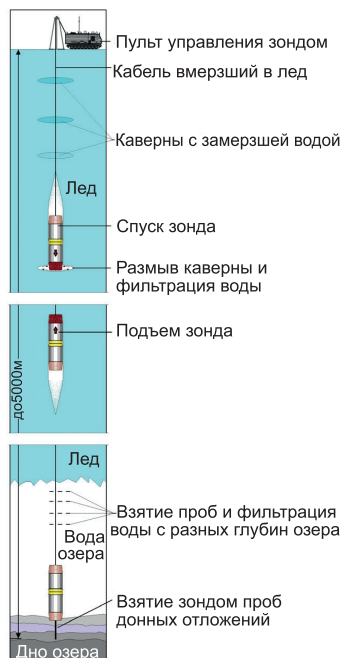
Относительно стабильные ледники, покрывающие поверхность планет и спутников Солнечной системы, – основные объекты исследований с применением ТГБ-криоботов: а – ледяная полярная шапка Марса; б – внутреннее строение спутника Сатурна Энцелада с многочисленными гейзерами, пробивающими ледяную кору; в – строение ледяного щита толщиной 4 км в Антарктиде. Рисунок NASA.

водную систему Tesla – энергоинформационный кабель длиной 5 км, позволяющий уменьшить потери

энергии, вес и габариты катушки с кабелем в несколько раз и не допустить короткого замыкания при его

перекручивании. Компьютер позволит автоматически поддерживать режим резонанса напряжений одно-

Схема герметичного отбора проб талой воды из толщи льда, водной среды озера и донных отложений в подледниковых средах на Земле. Рисунки авторов.



проводного кабеля: "настраивать" собственную частоту резонанса линии при изменении длины кабеля, температуры окружающей среды и других факторов, снижая потери электроэнергии до минимума.

Например, однопроводный стальной несущий кабель диаметром 0,7 мм и длиной 5 км будет весить всего 13 кг, иметь грузоподъемность 50 кгс, что допустимо при малых нагрузках на него. Для уменьшения вероятности обрыва несущего кабеля при извлечении зонда на ледовую поверхность его первые 100 м должны иметь диаметр 1–2 мм, что повысит его грузоподъемность до 100–400 кгс. Термоголовку в виде воронки целесообразно выполнить из четырех независимых секций с насосами – для размыва струями горячей воды каверн в толще льда и зоны ледяного забоя. Это позволит дополнительно увеличить скорость плавления льда за счет турбулентной теплопередачи, а также изменять с помощью разнонаправленных струй воды направление движения зонда при обходе различ-

ных препятствий, встречающихся в ледяной толще (например, камней). Уплотняющие "юбки" могут быть выполнены из силикона или из титана в виде тонких закрылок.

В земных условиях все элементы ТГБ-зонда должны сохранять свою работоспособность при температурах от -70°C до $+200^{\circ}\text{C}$, давлении до 500 атм, а также после периодических жестких стерилизаций автоклавированием, озонированием или под воздействием гамма-облучения.

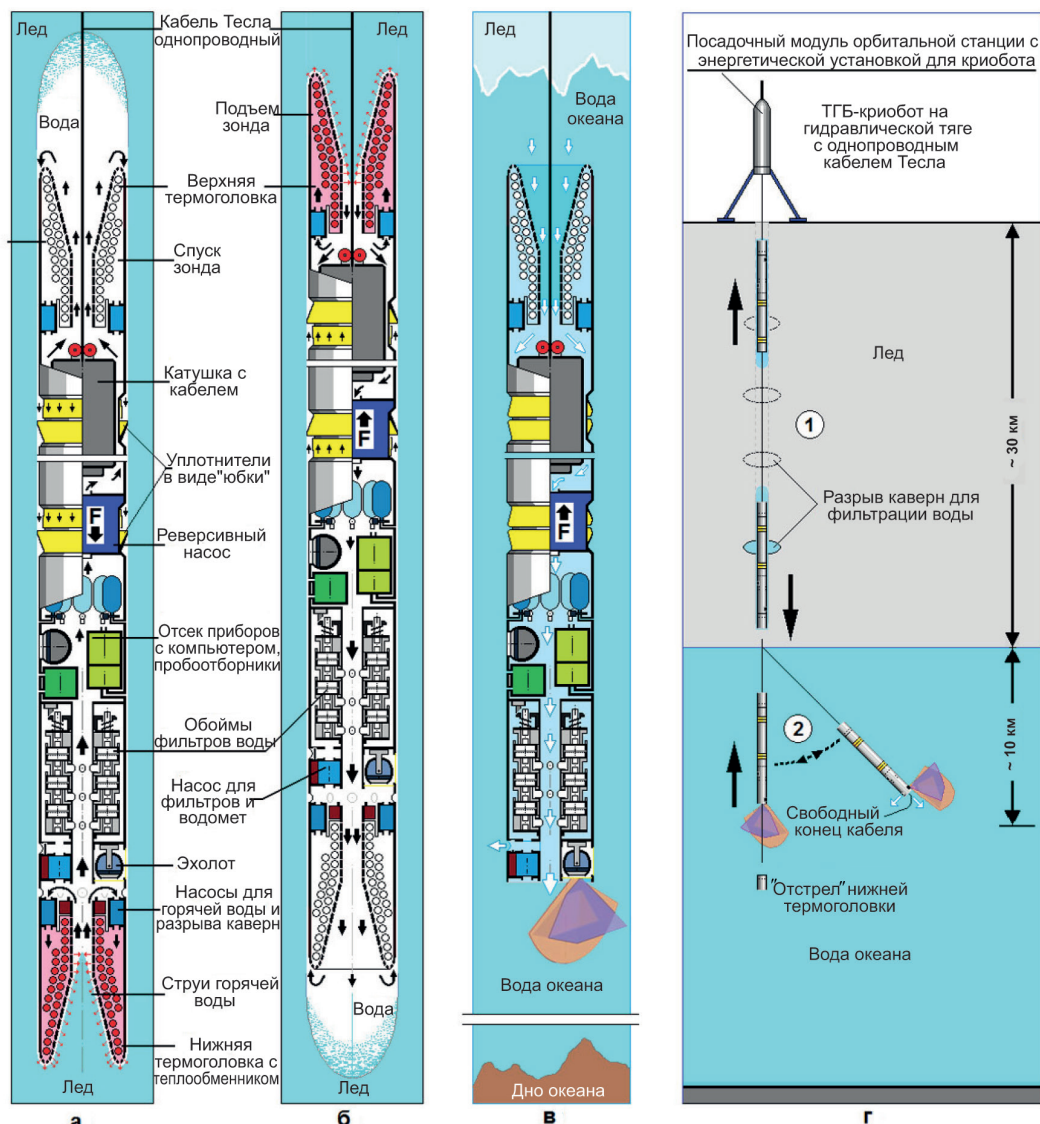
Планируемые параметры ТГБ-зонда для проникновения в толщу льда на Земле на глубину до 5 км: диаметр – 0,1 м, длина – до 4 м, вес – до 20 кг (без кабеля); диаметр однопроводного энергоинформацион-

ного кабеля – от 0,5 до 2 мм, средняя скорость движения – до 10 м/ч при мощности до 10 кВт и температуре льда до -60°C . Скорость ТГБ-зонда во льду можно повысить до 30 м/ч путем увеличения мощности насоса и термоголовки до 20 кВт.

Возможно оснащение ТГБ-зонда измерительными аналитическими приборами, подобно таковым для зондов типа "RECAS", причем многие конструкции измерительных модулей могут не нуждаться в изолированных отсеках, выдерживающих давление до 500 атм. Например, работа и герметичность фильтрационных устройств определяется малым перепадом, а не абсолютной величиной действующего давления окружающей зонд среды.

Отбор биологических проб на заданном горизонте в ледяной толще осуществляется при неподвижном зонде, при достижении дна озера в нижней термоголовке через заборное отверстие выдвигается пробоотборник донных отложений, затем пробы грунта засасываются в трубы с запорными клапанами на торцах и убираются в кассетницу в корпусе зонда.

Эксплуатация ТГБ-зонда на ледяных щитах Земли толщиной до 5 км потребует, по сравнению с "RECAS" (при одинаковой мощности в 10 кВт), в 5–6 раз меньше топлива, что ускорит такой же объем исследований в 5–6 раз и позволит организовать системные исследования



Предлагаемый проект ТГБ-крибота для исследования льда на Европе: а – ТГБ-крибот при спуске в толщу льда под давлением силы; б – подъем ТГБ-крибота через толщу льда вверх под действием подъемной силы; в – ТГБ-крибот на спутнике Европа, в океане, после "отстрела" нижней термоголовки; г – этапы работ ТГБ-крибота (1 – его спуск и подъем на гидравлической тяге по несущему кабелю; 2 – спуск в океан, "отстрел" нижней термоголовки, съемка рельефа дна и поверхности раздела льда – вода с помощью торцевого и бокового эхолотов крибота). Рисунок авторов.

криосферы за более короткий период (2–3 месяца) сезонных работ в полярных регионах.

По нашим оценкам, для обслуживания ТГБ-зонда в полевых условиях достаточ-

но бригады из 3–4 специалистов, силовой установки и пульта управления на базе

одного вездехода, что в десятки раз дешевле электро-механического бурения и гидродинамического бурения горячей водой.

ПРОЕКТ ТГБ-КРИБОТА

Для успешной реализации разрабатываемого при поддержке NASA проекта крибота "Валькирия" авторы статьи предлагают воспользоваться принципами, заложенными в эскизном проекте ТГБ-зонда:

- применить технологию увеличения скорости термического плавления льда под воздействием гидравлической силы, что позволит такому устройству бурить лед со скоростью до 50 м/ч и "подниматься" на поверхность льда автономно, без нагрузки на энергоинформационный кабель;

- использовать однопроводную систему Тесла для передачи энергии криботу и телеуправления им, что позволит уменьшить вес и габариты кабеля, потери электроэнергии, а также исключит короткое замыкание в кабеле.

Предлагаемая авторами принципиальная конструкция ТГБ-крибота включает в себя: одинаковые воронкообразные термоголовки на торцах корпуса зонда; сквозной канал для протока талой воды и сматывания кабеля с катушки внутри крибота; реверсивный гидронасос внутри и уплотнители –

"юбки" снаружи корпуса зонда. Спуск и подъем такого ТГБ-крибота в толще льда на спутнике Юпитера Европе подобен движению ТГБ-зонда на Земле и схеме проводимых исследований в толще льда: "отстрелив" в водной среде нижнюю термоголовку (она больше не понадобится), зонд может провести батиметрическую съемку рельефа дна океана с помощью торцевого эхолота. Диапазон батиметрических исследований дна и поверхности раздела лед-вода можно значительно расширить, опустив ТГБ-крибот в океан на глубину до 10 км, управляя водометами реверсивного насоса, что позволит "отклонять" зонд на несколько километров от вертикали спуска.

При осуществлении подъема ТГБ-крибота на поверхность Европы не обязательно наматывать кабель на катушку внутри корпуса зонда, а можно выводить его вниз, пропуская сквозь зонд за пределы корпуса. После извлечения ТГБ-крибота с пробами на поверхность на вмороженный кабель можно "нанизать" другой крибот для дальнейших исследований льда и подледного океана, но уже без катушки и длинного кабеля. "Облегченный" ТГБ-крибот можно неоднократно перемещать по кабелю вниз и вверх, используя вмороженный кабель как направ-

ляющий монорельс, не нарушая ледяной изоляции. Это позволит существенно снизить финансовые и временные затраты на проникновение в толщу льда и, соответственно, увеличить объемы исследований.

ПРЕИМУЩЕСТВА ПРОЕКТА ТГБ-КРИБОТ

ТГБ-крибот может передвигаться как во льду, так и в воде посредством водометных струй (см. выше), что позволит использовать такой зонд для исследования двух сред (льда и воды), то есть он может быть одновременно крио- и гидроботом. Разработку американских специалистов – крибот "Валькирия" – планируют использовать, в основном, для бурения ледяной толщи, а выпуск в водную среду специального гидробота, по мнению авторов, усложняет проект и делает его более затратным.

По сравнению с проектируемым криботом "Валькирия", предлагаемый авторами настоящей статьи ТГБ-крибот позволит:

- снизить примерно в 10 раз мощность источника питания, который необходимо доставить на ледяную поверхность спутника Юпитера Европы;

- уменьшить диаметр крибота в 2–3 раза и увеличить на порядок скорость бурения льда – до 50 м/ч;

- в несколько раз уменьшить габариты катушки с

кабелем, применив одно-проводную систему Тесла; причем в этой энергоинформационной системе минимальны ограничения по радиусу изгиба однопроводного кабеля и пределу передаваемой мощности, исключены короткие замыкания, а потери энергии в режиме резонанса напряжений ничтожно малы;

– значительно ускорить возврат криобота с проба-

ми на ледяную поверхность Европы, используя гидравлическую силу подъема, силу Архимеда;

– сократить цикл (спуск + подъем) исследований льда и подледного океана на Европе до 4-х месяцев при средней скорости движения криобота – 30 м/ч;

– уменьшить в несколько раз объем и массу криобота, затраты на его доставку к спутнику Юпитера; а также

многократно снизить риски космической миссии и уменьшить стоимость всех работ.

Для реализации проектов создания ТГБ-зондов необходимы заказчики и профессиональные разработчики новых технологий, связанных с изучением ледяных щитов Земли и с получением уникальных знаний о границах распространения жизни и эволюции планет Солнечной системы.

Информация

Сверхпузыри газа вокруг галактик

Астрономы обсерваторий с 10-м телескопами – Кека II (Гавайи) и Большого Канарского – открыли две яркие радиогалактики: TXS0211–122 и TXS 0828+193; они находятся в 11,5 млрд св. лет от нас, в их центрах располо-

жены активные ядра самого высокоэнергетического типа, известного ученым (см. стр. 3 обложки, вверху). Расширяющиеся газовые массивные сверхпузыри вокруг далеких галактик, появление которых, по-видимому, обусловлено "обратной связью", получаемой галактиками от активных ядер, инжектируют большие количества энергии обратно, в родительскую галактику, создавая мощные ветра, которые сметают газ и пыль, лежащие на их пути, и формируют расширяющийся сверхпузырь. Изучение взаимодействия между сверхмассивной черной дырой и

родительской галактикой является ключом к пониманию эволюции наиболее массивных галактик. Ультрафиолетовое излучение, исходящее со стороны аккреционного диска черной дыры, может временно подавить формирование звезд, ионизируя межзвездную среду, а мощные потоки газа в направлении черной дыры могут привести к постоянному подавлению формирования звезд.

*Пресс-релиз
Обсерватории Мауна-Кеа,
31 марта 2018 г*

"ЭкзоМарс-2020": испытания парашютной системы

В рамках программы подготовки к запуску АМС по совместной российско-европейской программе "Экзо-Марс-2020" прошли испытания парашютной системы, с помощью которой планируется обеспечить мягкую посадку на поверхность Красной планеты

российской научной платформы и европейского марсохода. В Кируне (Швеция) с высоты 1,2 км с вертолета был сброшен тестовый имитатор десантного модуля с установленной на нем парашютной системой. После раскрытия вытяжного парашюта был введен в действие вытяжной (и основной) 35-метровый парашют весом 70 кг (парашютная система в сборке весит 195 кг), он успешно раскрылся при отрицательной температуре воздуха. Весь процесс посадки занял около 2,5 мин. После приземления бортовое оборудование имитатора "направило" телеметрию на станцию слежения в режиме реального времени.

Во время последующих тестов планируется провести испы-

тание всей последовательности работы парашютной системы: раскрыть первый и второй комплекты вытяжного и основного парашютов. Модуль будет сброшен из стратосферного шара с высоты почти в 30 км в условиях низкого атмосферного давления (характерно для атмосферы Марса).

Космический аппарат, который должен будет доставить десантный модуль на Марс, планируется запустить в 2020 г.; посадка на планету ожидается в марте 2021 г. (Земля и Вселенная, 2016, № 3).

*Пресс-релизы ESA
и ИКИ РАН,
29 марта 2018 г.*

Российский прибор продолжает работу на Марсе

19 марта 2018 г. российский прибор ДАН на борту марсохода "Кьюриосити" произвел юбилейный, 8-миллионный, импульс глубинного нейтронного зондирования поверхности Марса нейтронами высоких энергий. Исследования состава вещества вдоль трассы движения марсохода проводятся, начиная с августа 2012 г. (Земля и Вселенная, 2012, № 3,

с. 110–112; 2015, № 1, с. 50–51). За это время марсоход прошел около 18,5 км пути на дне кратера Гейл, прибор ДАН провел более 700 сеансов нейтронного зондирования вещества. По данным нейтронных измерений, полученных с помощью прибора ДАН, проведены оценки содержания воды и хлора в марсианском веществе. Эта информация позволяет определить условия формирования дна древнего озера, которое заполняло кратер в древнюю эпоху, и "пролить свет" на процессы его высыхания и эрозии.

Среднее содержание воды в грунте кратера вдоль трассы движения марсохода составляет около 2,6% по массе, при этом оно колеблется примерно от 0,5 до 4%. Это довольно неожиданный результат, поскольку более

ранние исследования орбиты Марса "давали" другую цифру – 4–7%. Среднее содержание хлора в грунте составляет 1,0 %.

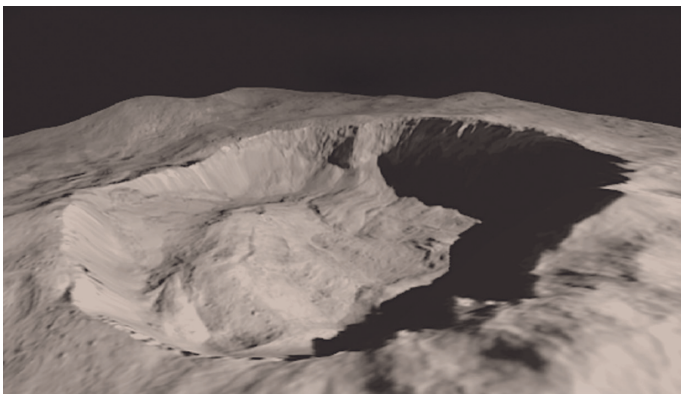
Другой необычный вывод состоит в том, что картина распределения водяного льда в верхнем слое грунта не похожа на ту, что можно было бы наблюдать, например, в пустыне на Земле, где ситуация гораздо более однородна: если воды в определенном месте под поверхностью мало, то вряд ли ее содержание заметно увеличится всего в нескольких метрах от него. Таким образом, предстоит понять, как вода могла отложиться в грунте в форме малых "островов".

*Пресс-релиз ИКИ РАН,
19 марта 2018 г.*

Изменения на Церере

На северной кромке 20-км ударного кратера Juling Цереры зафиксировано увеличение количества водяного льда и обнаружены гидратированные карбонаты, маркирующие области недавнего выхода грунтовых вод. Наблюдения, проводимые с апреля по октябрь 2016 г. с помощью АМС "Доун" ("Dawn"; Земля и Вселенная, 2016, № 3, с. 55; 2017, № 1, с. 96–98; 2017, № 4, с. 54) показали, что эта единственная карликовая планета во внутренней части Солнечной системы остается "активным миром", который и сегодня продолжает меняться и эволюционировать.

Хотя в целом поверхность Цереры – сухая и темная, но картирующий инфракрасный



На северной кромке кратера Juling, погруженной в вечную тень, обнаружено увеличение количества водяного льда. Снимок получен 30 августа 2016 г. с помощью АМС "Доун". Фото NASA.

спектрометр VIR на борту станции обнаружил "обнажения" водяного льда в десятках разных мест. Отложения льда в кратере Juling – первая прямая регистрация изменений на поверхности Цереры.

Как рассказал Андреа Рапони из Института астрофизики и планетологии (Рим, Италия), ведущий автор исследования, приближение Цереры к перигелию и наступление "весны" вызвало испарение водяного льда, скрытого нег-

лубоко под поверхностью, и последующую конденсацию водяного пара на холодной, вечно затененной стенке кратера Juling. Образование "свежего" инея увеличило количество водяного льда в этой области; потепление также могло вызвать оползни, "обнажившие" подповерхностный лед.

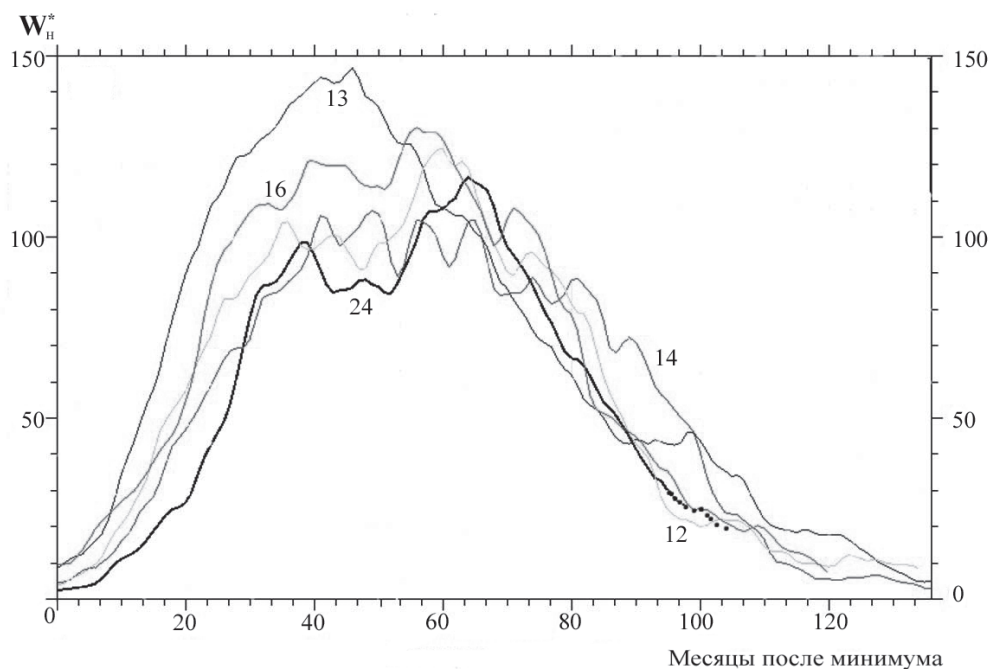
*Пресс-релиз NASA,
15 марта 2018 г.*

Солнце в феврале – марте 2018 г.

Пятнообразовательная активность в эти месяцы, в течение 12 сут, была на очень низком и низком уровнях, но с пятнами, а 35 сут видимый

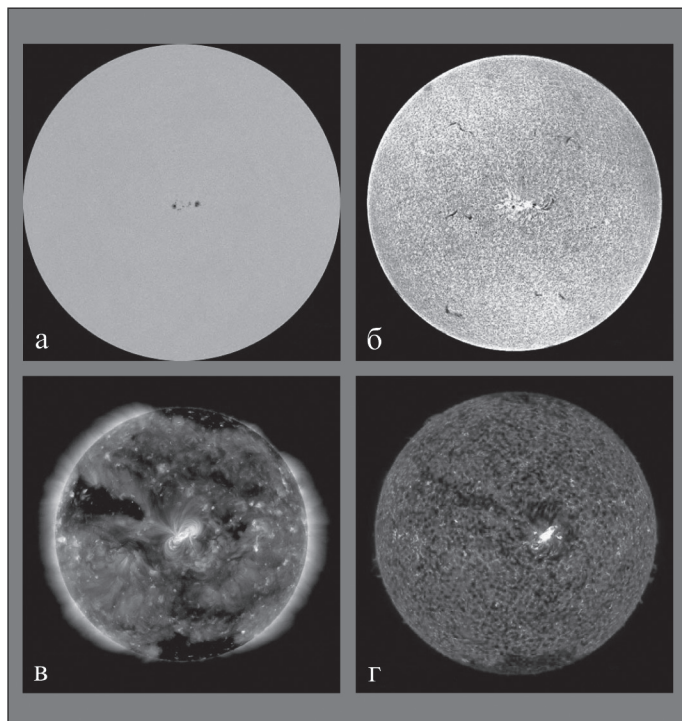
диск Солнца был беспятенным. Из 5 небольших групп солнечных пятен 2 появились в Северном полушарии. Наиболее значительной была

группа пятен Южного полушария: она вышла на видимый диск Солнца 3 февраля, через 13 сут ушла за западный лимб. В максимуме развития



Ход развития (104 месяца) текущего, 24-го цикла солнечной активности, среди достоверных (начиная с 1849 г.) низких и среднего (№ 13) солнечных циклов. W^* – сглаженные за 13 месяцев относительные числа солнечных пятен в новой системе (введена с 1 июля 2015 г.). Высота текущего солнечного цикла в новой системе такова: $W_n^* = 116$ против $W^* = 82$ – в старой.

Солнце 11 февраля 2018 г.: а – фотосфера в непрерывном спектре ($\lambda = 4500 \text{ \AA}$); б – в самой сильной линии водорода H_α ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$); в – в линии крайнего ультрафиолета $Fe\ XII$ ($\lambda = 193 \text{ \AA}$); г – в линии крайнего ультрафиолета $He\ II$ ($\lambda = 304 \text{ \AA}$). Снимки получены с помощью космической солнечной обсерватории "SDO" и наземной обсерватории Big Bear (H_α ; <http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>).



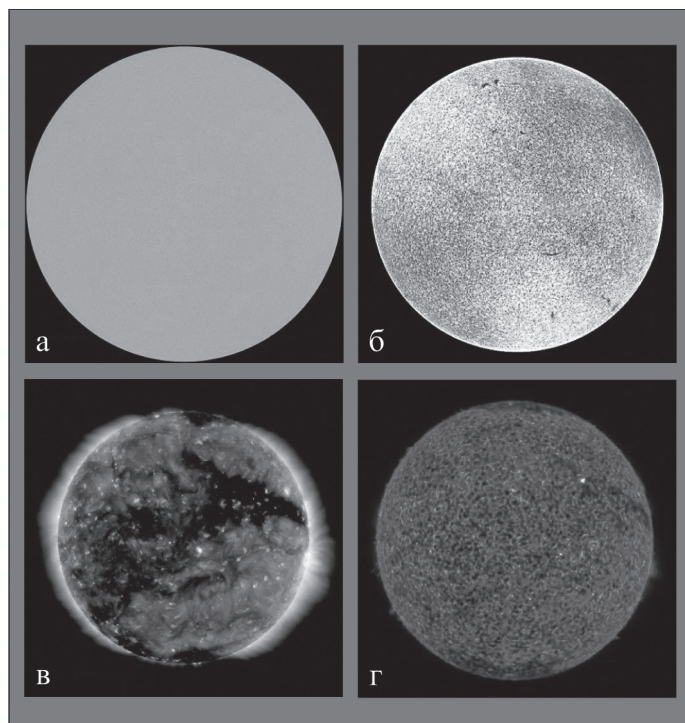
площадь ее пятен составила 240 миллионов долей полусферы. Кривая роста сглаженных за год значений относительного числа пятен продолжает снижаться, оставаясь в пределах изменений 12-го и 16-го солнечных циклов, поэтому точку минимума текущего цикла можно ожидать во второй половине 2020 г. Текущие среднемесячные значения чисел Вольфа, мы как и Служба состояния околоземного пространства (www.swpc.noaa.gov) придерживаемся старой, классической системы) $W_{\text{фев.}} = 6,4$ и $W_{\text{мар.}} = 1,5$. Сглаженное значение этих индексов в августе и в сентябре 2017 г. составило $W^* = 11,7$ и $W^* = 10,9$ соответственно.

2 февраля в Южном полушарии появилась группа-однодневка, которую уже 3 февраля сменила устойчивая группа пятен, которая прошла весь видимый диск Солнца. Максимум ее развития пришелся на 9–10 февраля, когда в ней осуществилось несколько солнечных вспышек низкого

рентгеновского балла С. После захода этой группы пятен за западный лимб 16 февраля Солнце было беспятенным до 26 февраля, когда уже в Северном полушарии, в центральной зоне, появилась короткоживущая (5 сут) группа пятен, в которой также наблюдались малые вспышки. Максимальное ежедневное значение относительных чисел солнечных пятен отмечено 11 февраля ($W = 28$), минимальное – 1–3 и 17–25 февраля ($W = 0$). Вспышечная активность была на низком уровне 4, 6, 10 и 12 февраля, на очень низком уровне – в течение остального периода. Выбросы солнечных волокон (2 события) наблюдались 5 и 6 февраля. Коронографы космической обсерватории

"SOHO" зарегистрировали более 6 корональных выбросов вещества. Три рекуррентные (повторяющиеся через оборот Солнца) корональные дыры проходили по видимому диску Солнца и одна вновь образованная. Высокоскоростные потоки от них заметного влияния на околоземное космическое пространство не оказали. На средних широтах Земли отмечены 2 малые магнитные бури – 5 и 17 февраля. Всего же в геомагнитном поле зарегистрировано 4 возмущенных дня. На геостационарных орбитах очень высокие потоки ($> 10^7$ частиц/м²) релятивистских электронов с энергиями больше 2 МэВ наблюдались 18–27 февраля.

В марте солнечные пятна наблюдались только 7 сут, все



Солнце 16 марта 2018 г.: а – фотосфера в непрерывном спектре ($\lambda = 4500 \text{ \AA}$); б – в самой сильной линии водорода H_{α} ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$); в – в линии крайнего ультрафиолета Fe XII ($\lambda = 193 \text{ \AA}$); г – в линии крайнего ультрафиолета He II ($\lambda = 304 \text{ \AA}$). Снимки получены с помощью космических солнечных обсерваторий "SDO", "STEREO A" и наземной обсерватории Big Bear (H_{α} ; <http://www.solarmonitor.org/>).

остальное время Солнце было беспятенным. Группы-однодневки на видимом диске Солнца были 15 и 17 марта. Максимальное наблюдаемое относительное число солнечных пятен отмечено **17 марта (W = 15)**, минимальное – 3–14, 16, 19–29 марта (W = 0). Вспышечная активность в течение всего месяца оставалась на очень низком уровне. Выбро-

сы солнечных волокон (3 события) наблюдались 15–17 и 19 марта. Коронोगрафы космической обсерватории "SOHO" зарегистрировали больше 12 корональных выбросов вещества разной интенсивности. В марте наблюдались четыре рекуррентные корональные дыры. Геомагнитное поле было возмущенным 15, 16, 18, 19, 23 и 25 марта. Малые маг-

нитные бури отмечены 14–15 и 16–17 марта, вызваны прохождением Земли высокоскоростных потоков от корональных дыр. На геостационарных орбитах очень высокий поток ($> 10^7$ частиц/м²) релятивистских электронов с энергиями больше 2 МэВ наблюдался 3–4 и 17–31 марта.

Текущее состояние солнечной активности и ее прогноз на русском языке можно найти в интернете (<http://www.izmiran.ru/services/saf/>). Страница обновляется каждый понедельник.

*В.Н. ИШКОВ,
ИЗМИРАН*

Витольд Карлович Цераский

В 2019 году исполняется 170 лет со дня рождения Витольда Карловича Цераского – русского астронома, члена-корреспондента Петербургской АН, профессора Московского университета, директора Московской университетской обсерватории (Земля и Вселенная, 1974, № 6; 1993, № 5). Он – основатель московской школы астрофотометрии, талантливый педагог, прекрасный организатор, блестящий популяризатор науки, настоящий гражданин и патриот своей страны. Под его руководством была осуществлена перестройка обсерватории, преобразившая скромную деревянную в подобающую XX веку обсерваторию с большим рефрактором. Новое оборудование и модернизация старых инструментов определили тематику наблюдательных работ вплоть до середины XX в.

Витольд Карлович Цераский родился 9 мая (27 апреля по ст.ст.) 1849 г. в г. Слуцке Минской губернии Российской империи (ныне это территория Республики Беларусь), литовец по происхождению¹. Отец Карл Цераский (1817–1864) окончил Дерптский университет (ныне Тартуский). В 1841 г. он получил место преподавателя географии в городской гимназии Слуцка, где и обосновался со своей семьей. Гимназия относилась к числу старейших обра-



Профессор В.К. Цераский. 1891 г.

зовательных учреждений России – она была основана в 1617 г. Отец привил детям любовь к наукам, литературе, истории и искусству. Мать, Стефания Александровна, была человеком необычайной доброты и светлого природ-

¹Отец В.К. Цераского был из рода реформатских пасторов, носивших фамилию Вашкис ("восковщик"). В XVII в. фамилию переименовали на латино-польский лад: Цераускас. Однако в окрестностях местечка Швабишкис (расположенном в Литве почти на северной границе Литвы с Латвией, откуда и пошел род Цераских) до сих пор встречается фамилия Вашкис.



Гимназия в г. Слуцке, которую в 1867 г. окончил В.К. Цераский.

ного ума, она старалась постоянно окружать детей своим вниманием и заботой. Семья была очень дружной. У Витольда были друзья в гимназии, в дом приходили также друзья отца-учителя. Все это благотворно влияло на душу мальчика и его развитие. Мать заботилась об образовании Витольда и по окончании им гимназии настояла на том, чтобы сын продолжал образование, хотя семья из-за смерти отца терпела крайнюю нужду.

В 1867 г. Витольд поступил в Московский университет (ИМУ) на физико-математический факультет. Этот выбор был неслучаен: осенью 1858 г. он наблюдал на небе появившуюся яркую комету Донати. Необычайное небесное явление послужило началом его интереса к астрономии. Витольд с большим трудом постарался достать

книгу "Очерки астрономии" Дж. Гершеля (в переводе московского астронома А.Н. Драшусова; Земля и Вселенная, 2017, № 5; 2016, № 4).

Студенческие годы Цераского проходили в постоянной материальной нужде. Учась в ИМУ на втором курсе, он начал подрабатывать как сверхштатный "вычислитель" на университетской астрономической обсерватории, которая находилась на Пресне (Земля и Вселенная, 2011, № 3). В то время штат обсерватории состоял только из четырех человек, занимавшихся преподавательской деятельностью, а научную работу проводивших только в свободное от преподавания время. Цераскому предоставили для занятий и сна небольшую комнату в домике при обсерватории. Годы учения в ИМУ были годами борьбы с постоянной нехваткой средств к существованию: он подраба-

тывал частными уроками, за которые ему иногда и не платили. Но занятия любимым делом помогали преодолевать все препятствия. Витольд в процессе обучения в ИМУ слушал лекции известных профессоров: А.Ю. Давыдова, Н.Я. Цингера, Б.Я. Швейцера и Ф.А. Бредихина. На 4-м курсе Цераский написал сочинение на тему "Вычисление орбиты Марса по трем наблюдениям", за что был награжден золотой медалью и стал получать 20 руб. в месяц за работу на обсерватории.

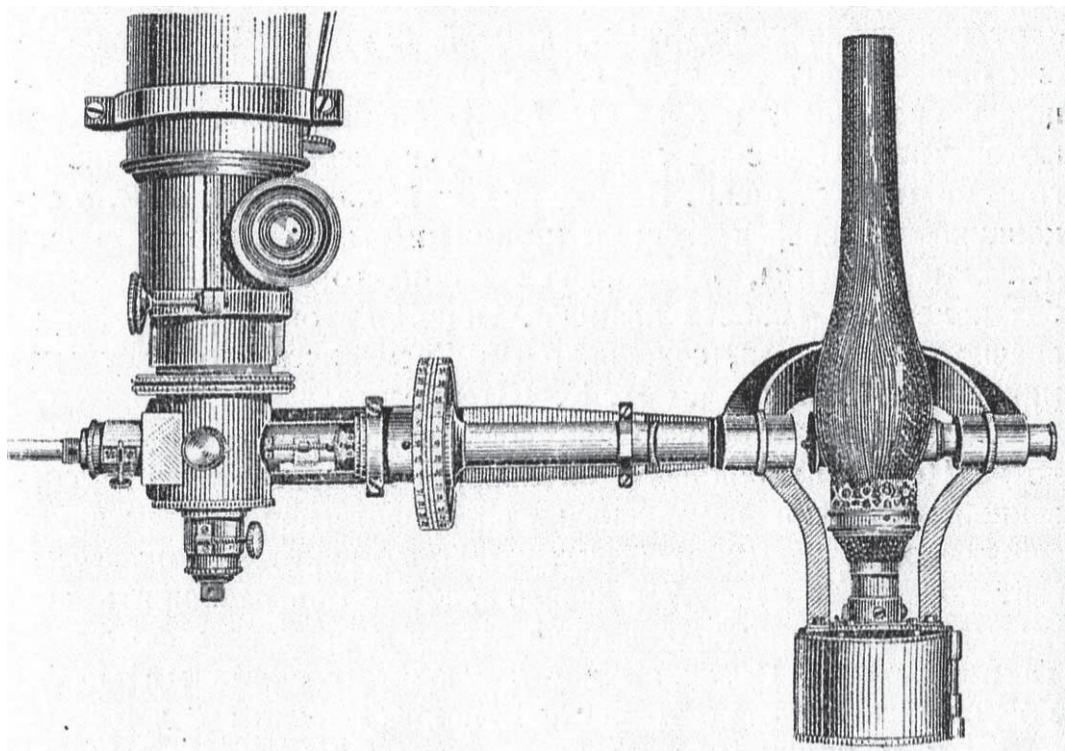
В июне 1871 г. он окончил университетский курс, получил степень кандидата и был оставлен при ИМУ. Ему предложили место сверхштатного ассистента Московской обсерватории с небольшой оплатой. Профессор М.А. Ковальский из Казанского университета предлагал ему



должность астронома-наблюдателя, было еще предложение занять кафедру в Кракове. Но он, несмотря на скромную должность, решил остаться работать в Московской обсерватории. В 1873 г. директором обсерватории становится Ф.А. Бредихин (Земля и Вселенная, 1982, № 1; 2015, № 2). В.К. Цераский активно включается в научную работу. Его ученик К.Д. Покровский впоследствии сви-



Московский университет. В.К. Цераский окончил его в 1871 г.



Астрофотометр Цельнера–Цераского. 1887 г.

детельствовал, что у Витольда Карловича была необыкновенная «...любовь к науке, благоговейное уважение к ее строгим методам... Скромный труженик, <он> не искал никаких особенных выгод, не умел и не хотел спекулировать на знании и заботился более не о том, как оценит его современник, а о том, что скажет потомство»².

В 1874 г. Государственная комиссия при Пулковской обсерватории командировала В.К. Цераского в экспедицию в Сибирь, в поселок Кяхту (территория Бурятии) для наблюдения прохождения Венеры по диску Солнца. Перед поездкой Цераский опубликовал статью, где давал советы наблюдателям с тщательно вычисленными им момен-

тами различных контактов прохождения Венеры по диску Солнца (для 41 пункта России). Путешествие в далекую Сибирь на лошадях было утомительным. Несмотря на слабое здоровье, ученый преодолел все трудности пути, но с погодой не повезло: солнце было закрыто облаками (фотографий было сделано так мало, что невозможно было получить нужный результат).

По возвращении из экспедиции Витольд Карлович (по предложению Бредихина) начал систематически фотографировать Солнце с помощью фотогелиографа Дальмейера, которым он пользовался в экспедиции. Наблюдения в то время осложнялись необходимостью для наблюдателя самому подготавливать фотопластинки

²Покровский К.Д. В.К. Цераский (к 75-летию со дня рождения) // Русский астрономический календарь на 1925 год. С. 115.

непосредственно перед наблюдением для мокрого коллодионного процесса, использовавшегося в то время. Цераский опубликовал три серии определений координат солнечных пятен. В 1877 г. фотографирование Солнца перешло к А.А. Белопольскому (Земля и Вселенная, 2004, № 5)³. В 1878 г. В.К. Цераский занимает должность астронома-наблюдателя и продолжает начатые в 1875 г. астрофотометрические наблюдения с поляризационным фотометром системы Цельнера. Астрофотометрия как самостоятельное направление в астрофизике еще только зарождалась.

В 1870-е и 1880-е гг. проявилась разносторонность личности Витольда Карловича: он не был узким специалистом, его живой ум интересовали литература, искусство, история. Он привлекал к себе своим общительным характером, разнообразием интересов и остроумием бесед. Вот как о нем вспоминал А.А. Белопольский: *«У меня с ним изжито было многое в жизни. Я был и его учеником, и его товарищем. Незабвенные годы нашего совместного пребывания на Московской обсерватории, когда у нас образовался кружок молодежи, связанной общими интересами науки, искусства и жизни, глубоко волновали меня в эпохи моей последующей жизни. Лидером этого кружка всегда был Витольд Карлович... он был душой нашего кружка...»*⁴. В круг его общения входили крупнейшие ученые – его современники, профессора Московского университета: философы

идеалист В.С. Соловьёв (1853–1900), выдающийся русский ученый Н.Е. Жуковский (1847–1921), историки М.С. Корелин (1855–1899) и Н.И. Кареев (1850–1931), математик-геометр Б.К. Млодзеевский (1858–1923).

Продолжая научную работу в области астрофотометрии, В.К. Цераский наметил для себя большую программу определения звездных величин околополярных звезд (1880–1903). Среди них он выбирает 58 ярких звезд (5,5–8,0^m) севернее +75° по склонению. Тщательно и многократно наблюдает, связывает эти звезды с Полярной звездой, значение звездной величины которой по международному стандарту (по HRP) тогда было принято 2,12^m. Получившийся каталог 58 звезд определил его фундаментальную фотометрическую систему⁵.

Цераский, наблюдая на астрофотометре системы Цельнера, изготовленном в Германии фирмой "Аусфельд", подверг критическому исследованию конструкцию фотометра. Он рационально улучшил этот инструмент, буквально совершенствуя каждую отдельную его часть. В результате стало возможно наблюдать звезды как ярче девятой звездной величины, так и слабее. Результаты исследования инструмента, параллельно разработанные приемы наблюдений и ряды самих наблюдений опубликованы в "Трудах Московской обсерватории"⁶. Обработка большого наблюдательного материала и модернизация астрофотометра послужили основой для его магистерской

³Витольд Карлович был на 5 лет старше А.А. Белопольского, являясь для него старшим товарищем и наставником. Под влиянием В.К. Цераского и Ф.А. Бредихина А.А. Белопольский стал настоящим астрономом, хотя после окончания Московского университета, увлекаясь техникой, хотел быть инженером (впоследствии Белопольский стал академиком и директором Пулковской обсерватории).

⁴Блажко С.Н. Жизнеописание Цераского / В кн.: Цераский В.К. Избранные работы по астрономии. М.: Гостехиздат, 1953. С. 15.

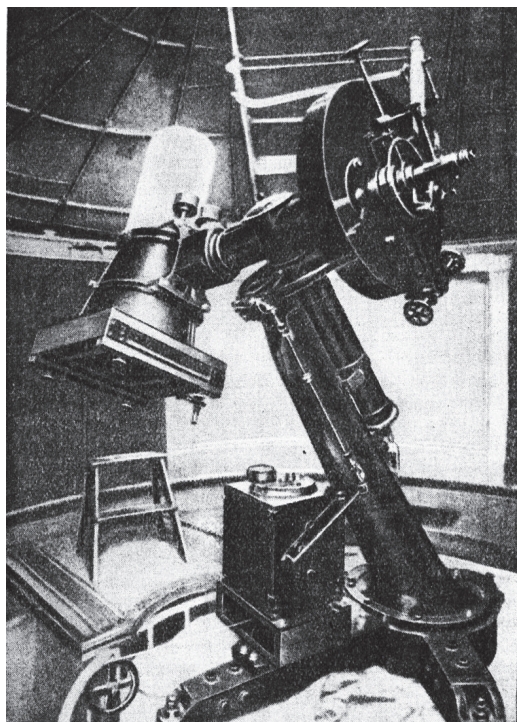
⁵Воронцов-Вельяминов Б.А. Научная деятельность В.К. Цераского / в кн.: В.К. Цераский. Избранные работы по астрономии. М.: Гостехиздат, 1953. С. 42.

⁶Блажко С.Н. Научные работы проф. В.К. Цераского / Русский астрономический календарь на 1925 год. С. 120.

диссертации под названием "Об определении блеска белых звезд", которую он защитил 29 января 1883 г. в ИМУ.

В завершение всех исследований и усовершенствований в 1887 г. В.К. Цераский построил новый фотометр, основанный на прежнем принципе. Этот инструмент стал называться астрофотометром Цельнера–Цераского. Прделанная работа нашла свое отражение в теме докторской диссертации Цераского – "Астрономический фотометр и его приложения", напечатанной в "Математическом сборнике" Московского математического общества. После защиты диссертации 30 мая 1888 г. он получил степень доктора астрономии и геодезии. В 1889 г. Цераский заслуживает звание экстраординарного профессора. Ordinарным профессором кафедры астрономии и геодезии физико-математического факультета ИМУ он стал только в 1896 г.

Цераский никогда не сомневался в преимуществе фотометрических наблюдений и большой значимости работ по составлению обширных фотометрических каталогов звезд для дальнейшего развития астрофизики. В 1891–1893 гг. Витольд Карлович, продолжая наблюдения в околополярной зоне, расширил свои фотометрические исследования, включив звезды двойного звездного скопления η и χ в созвездии Персея и скопления в созвездии Волосы Вероники. В первом случае определил звездные величины 70 звезд (от $6,4^m$ до $8,0^m$) и более слабых звезд (до $13,2^m$), а в 1897–1901 гг. определил звездные величины 82 относительно ярких звезд (от $6,4^m$ до $8,0^m$) и



более слабых (до $13,5^m$) во втором случае. Однако большая часть многочисленных наблюдений, выполненных Цераским, осталась необработанной. Всего за время фотометрических работ (с 1875 по 1909 гг.) Витольд Карлович произвел более 4 тысяч наблюдений, охвативших более 800 звезд со склонениями от $+75^\circ$ до $+90^\circ$, а также от $+54^\circ$ до $+75^\circ$. Он не сравнивал полученные данные с другими, но из своих предыдущих исследований смог вывести абсолютную ошибку одного сравнения блеска звезды $\pm 0,13^m$. В 1950-х гг. Г.А. Пономарева-Манова обработала наблюдения околополярных звезд (1880–1903 гг.), составив фотометрический каталог из 466 звезд⁷.

В.К. Цераского считают основателем московской школы астрофотометрии и даже "отцом русской астрофотометрии".

⁷Манова (Пономарёва) Г.А. Фотометрический звездный каталог В.К. Цераского / в кн.: В.К. Цераский. Избранные работы по астрономии. М.: Гостехиздат, 1953. С. 167 – 177.



Группа астрономов Московской обсерватории: П.К. Штернберг, С.Н. Блажко, Л.П. Цераская, С.А. Казаков, Ф.А. Бредихин, Б.П. Модестов и В.К. Цераский. 1901 г.

В своих астрофотометрических наблюдениях Цераский в 1879 г., потом – в 1880 г. случайно открыл переменность двух звезд: U и T Цефея. Вот тогда-то он заинтересовался наблюдениями несационарных звезд. В 1892 г. на своем фотометре наблюдал в течение 16 дней изменение яркости Новой звезды от 5^m до 12^m, вспыхнувшей в созвездии Возничего. Фотография как метод исследования небесных объектов еще только входила в астрономию, расширяя границы познания Вселенной. Цераский понял, что переменность звезд можно обнаруживать на фотографических пластин-

ках звездного неба, если систематически его фотографировать. Именно ему принадлежат широко известные слова, характеризующие достоинства фотопластинок для астрономии: «моментальность, панорамность, интегральность, детальность и документальность»⁸. Цераский придумывает схему специального астрографа: используется объектив Штейнгеля (апланат, D = 110 мм), приобретенный еще в 1890 г., заказывается в Германии новый инструмент, камера и штатив которого строятся по чертежам Цераского дрезденским механиком Ф. Гейде. В 1895 г. инструмент был уста-

⁸Куликовский П.Г. Витольд Карлович Цераский (к 125-летию со дня рождения) // Земля и Вселенная, 1974, № 6. С. 48–51.

новлен в Московской обсерватории и назван Витольдом Карловичем "экваториальной камерой". Началось методичное фотографирование звезд северного полушария неба. С.Н. Блажко (за ним и другие наблюдатели) получали на ней астропластинки, которые послужили открытию переменных звезд и других интересных объектов. Эти пластинки стали основой «стеклянной библиотеки» ГАИШ МГУ. К работе с астропластинками с целью открытия на них переменных звезд В.К. Цераский привлек свою жену – Лидию Петровну Цераскую. В результате 26-летнего упорного труда ею было открыто 219 переменных звезд. Экваториальная камера на Пресне проработала более 50 лет.

В 1875 г. началась педагогическая деятельность Цераского. По рекомендации Ф.А. Бредихина он был приглашен и начал читать лекции по физике на частных Высших женских курсах Герье, открытых в Москве в 1872 г. В.К. Цераский сразу проявил лекторский талант, его лекции имели большой успех у слушательниц.

С осени 1882 г. Витольд Карлович начал проводить практические занятия по астрономии на универсальных инструментах в обсерватории на Пресне. С ноября 1884 г., в качестве приват-доцента он стал читать лекции в ИМУ по теоретической астрономии, проводить обязательные курсы по сферической, описательной и практической астрономии. Позднее были изданы следующие учебные пособия Цераского: "Сферическая астрономия. Лекции" (1894); "Описание главнейших астрономических инструментов. Лекции" (1895); "Астрономия. Лекции" (1907); лекции по сферической астрономии 1909/1910 учебного года были изданы в 1910 г.; "Описательная астрономия. Лекции" (1911).

Среди учеников В.К. Цераского – ряд известных советских астрономов: директора Пулковской обсерватории академики А.А. Белопольский и А.А. Михай-

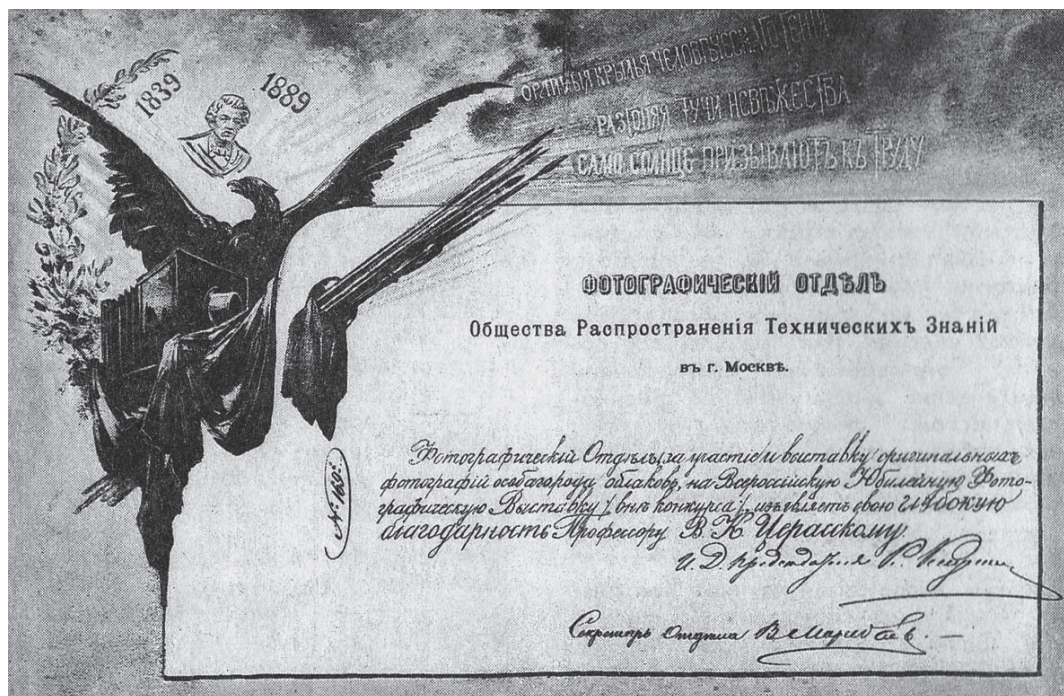


Л.П. Цераская. 1896 г.

лов, члены-корреспонденты АН СССР С.Н. Блажко, А.А. Тихов и С.В. Орлов, К.Д. Покровский, директор Московской обсерватории П.К. Штернберг и профессор С.А. Казаков.

Цераский был блестящим популяризатором астрономических знаний. Его публичные лекции получили известность. Начиная с 1880-х гг., чаще всего он выступал в Обществе любителей естествознания, антропологии и этнографии. На физическом отделении этого Общества Витольд Карлович читал популярные лекции по астрономии.

В 1883–1884 гг. Цераский совершил путешествие в Германию, там он посетил различные обсерватории, обстоятельно ознакомился с их устройством, в университетах слушал лекции известных ученых – таких, как физик и физиолог Г.-Л.-Ф. Гельмгольц. Но, кроме того, поводом для поездки была и статья о Н. Копернике, которую он должен был



Благодарственное письмо, выданное В.К. Цераскому за фотографии серебристых облаков на выставке в Москве, посвященной 50-летию Общества распространения технических знаний. 1889 г.

подготовить к очередному публичному выступлению. Поэтому он отправился во Фрауэнбург, где ранее жил Коперник, потом проехал в Копенгаген и посетил остров Вен, где в XVI в. находилась знаменитая обсерватория Тихо Браге Ураниборг.

В 1884 г. у Цераского изменилось семейное положение: он женился на Лидии Петровне Шелеховой (1855–1931) – учительнице французского языка, окончившей женские двухгодичные педагогические курсы в Петербурге и начавшей с 1875 г. преподавать в Москве. Вскоре в семье Цераских родился сын Костя. В будущем он стал врачом, а в конце жизни отца окружил его заботой и вниманием. Лидия Петровна была большим другом и помощницей Витольда Карловича в его научной работе по переменным звездам.

Как астроном-наблюдатель Цераский живо реагировал на необычные небесные явления. Летом 1885 г. он вместе с А.А. Белопольским наблюдал "светящиеся", как их сначала называли, то есть серебристые облака. Первые наблюдения Витольд Карлович сделал 12 июня 1885 г. Цераский и Белопольский наблюдали серебристые облака одними из первых. Они первыми определили их высоту (75 км) – наиболее близкую к позднейшим определениям высот (80–82 км). Фотографии серебристых облаков, сделанные Витольдом Карловичем, не сохранились. Но в 1889 г. в Москве, на выставке Общества распространения технических знаний (ОРТЗ), за фотографии серебристых облаков Цераский получил "Благодарность".

В 1890 г. Ф.А. Бредихина назначают директором Пулковской обсерватории.

Большой 15-дюймовый двойной рефрактор Московской обсерватории, установленный в 1901 г.

После его отъезда в Петербург управление Московской обсерваторией перешло к Цераскому (в должности директора он проработал более 25 лет). Витольд Карлович уже имел репутацию строгого, осмотрительного естествоиспытателя и блестящего лектора; теперь же, в процессе руководства обсерваторией, он присоединил репутацию организатора научного учреждения. За годы пребывания Цераского на посту директора Московская обсерватория полностью преобразилась.

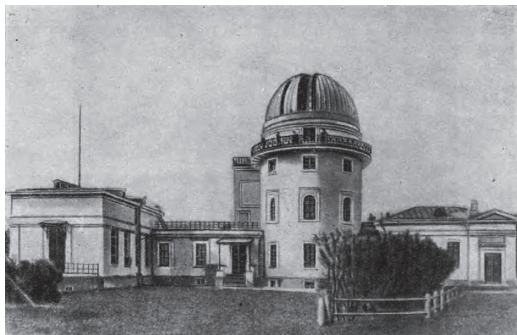
В 1891 г. Российское правительство выделило миллион рублей на реконструкцию и обновление ИМУ, часть средств потратили на усовершенствование Московской обсерватории на Пресне. В 1895–1903 гг. Витольд Карлович продолжает заниматься перестройкой и переоборудованием обсерватории с большой тщательностью и энергией. В 1895–1896 гг. с северной стороны к главной башне пристраивают большую аудиторию с двумя кирпичными столбами и с отдельным входом для практических занятий студентов. Весной 1897 г. в ней начали читать лекции. Под новым куполом в 1901 г. устанавливается новый инструмент – двойной большой астрограф-рефрактор с двойной трубой: с 15-дюймовыми (оптическим и фотографическим) объективами ($F = 6,5$ м) работы мастеров-братьев Анри из Парижа и с параллактической установкой братьев Репсольдов из Гамбурга. Экваториальная камера была установлена в 1895 г. в отдельном павильоне, южнее меридианного зала, в виде небольшой башни.



Во второй половине 1890-х гг. Цераский заказал в Германии 7-дюймовый рефрактор с объективом-апохроматом Цейсса. Средства на постройку экваториальной камеры, 7-дюймового рефрактора и образцовой башни-павильона для него были пожертвованы университетским товарищем и другом Цераского А.А. Назаровым⁹. В 1895–1896 гг. была уже возведена Назаровская башня. В 1902–1903 гг. модернизирован меридианный круг.

В организации научных работ в обсерватории Витольд Карлович был очень разносторонним: помимо основных работ в обсерватории велись наблюдения затмений спутников Юпитера и покрытий звезд Луною. Цераский не пропускал случая пронаблюдать редкие небесные явления:

⁹ А.А. Назаров, получив образование в Московском университете, судя по архивным данным, стал заниматься купеческой деятельностью, поэтому и смог финансово поддержать Цераского в модернизации университетской обсерватории.



Вид Московской обсерватории после перестройки под руководством В.К. Цераского. 1903 г.

к примеру, такие, как прохождение Меркурия по диску Солнца (1893) и прохождение кометы Галлея по диску Солнца (1910). Обеспечивая обсерваторию новыми инструментами, Цераский никогда не отказывался от применения в исследованиях простых устройств. Например, таких, как:

- специальная кассета для определения точного масштаба снимков на фотогелиографе (1876–1878);
- в статье "О числе звезд в Плеядах" он предложил остроумный метод для отделения звезд фона от звезд скопления (1884);
- удобная карта для наблюдения метеорного потока "Персеиды", опубликованная в 1890 г.;
- прибор для определения видимой угловой скорости метеоров (1898);
- гелиометрический объектив для определения формы солнечного диска (1899);
- изобретенный Цераским окуляр для детального изучения тонкой структуры солнечных пятен и фотосферы (1906);

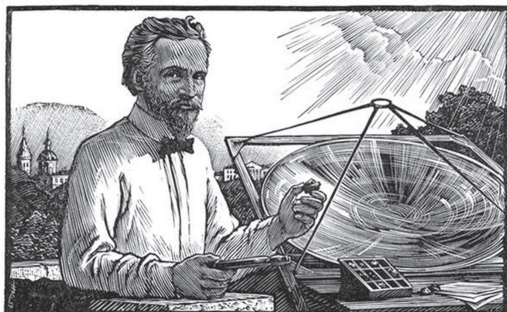
– термоэлектрическая батарея, которая работала под действием солнечных лучей (1908).

В 1895 г. Витольд Карлович проводил опыты с большим вогнутым зеркалом ($D=1$ м, $F=1$ м), расплавляя в его фокусе солнечными лучами самые тугоплавкие вещества с целью определения температуры поверхности Солнца. Тогда в научном мире делались только первые шаги в изучении этого вопроса.¹⁰ Температура поверхности Солнца, вычисленная В. Вином по формуле закона смещения, получилась равной около 5800 К. Цераский проводил свои опыты приблизительно в это же время и опубликовал результаты в 1896 г. В 1899 г. немецкий астроном-спектроскопист Юлиус Шейнер (1858–1913), используя материалы В.К. Цераского относившиеся к определению температуры поверхности Солнца, вывел температуру поверхности нашего светила, равную 6600° С.

Витольд Карлович подошел вплотную и к определению звездной величины Солнца, проведя опыты в 1903 и в 1905 гг. Цераский предложил заменить Солнце с его огромным блеском, его отражением от плоско-выпуклой линзы в виде звездочки с ослабленным светом в известное число раз. Для сравнения отраженного блеска Солнца с блеском Венеры на башне метеорологической обсерватории, в 150 м от наблюдателя, был установлен теодолит. Вместо объектива на его трубе был укреплен 40-см черный диск, в центре которого была наклеена плоско-выпуклая линза. Своим фотометром Цераский измерял блеск Венеры, видимой днем в трубу фотометра, и блеск блика Солнца, создаваемого линзой. По оценке профессора Б.А. Воронцова-Вельяминова, «...определение звездной величины Солнца в 1903 г. мы... считаем венцом экспериментально-фотометрического

¹⁰ В 1893–1894 гг. немецкий физик В. Вин (1864–1828), опираясь на электромагнитную теорию света, вывел для абсолютно черного тела формулу плотности энергии излучения, в зависимости от частоты излучения и температуры излучающего тела. В 1911 г. В. Вин был удостоен Нобелевской премии за сформулированные им три закона энергии излучения.

В.К. Цераский с параболическим зеркалом, с помощью которого он в 1895 г. определял температуру поверхности Солнца. Гравюра Н.И. Калиты.



искусства и изобретательности В.К. Цераского». В итоге звездная величина Солнца была равна – $26,89^m$, второй опыт в 1905 г. дал результат: – $26,50^m$.

Важно отметить также деятельность Витольда Карловича как преподавателя и профессора Физико-математического факультета (с 1889 по 1911 гг.). В течение этих 22 лет Цераский принимал активное участие в университетских делах. В 1901 г. он входил в состав Комиссии, избранной Советом ИМУ для рассмотрения вопросов о необходимых преобразованиях в университетах. В 1904–1905 гг. в очень сложной обстановке в стране В.К. Цераский возглавлял Комиссию Совета по делам студенческих учреждений, рассматривавшую уставы и положения студенческих научных кружков и обществ взаимопомощи, занимавшуюся вопросами разрешения студенческих сходов и собраний.

Философские взгляды Цераского ярче всего раскрывались в его научно-популярных статьях, в которых он выступал с позиций стихийного материализма, был проводником материалистического миропонимания в естествознании. В статье «Астрофотографические работы Московской обсерватории» ("Русский астрономический календарь на 1902 год") Витольд Карлович писал об объективности окружающего нас мира: «Звездное небо, биологические явления в тесных пределах Земли и духовная деятельность в нас самих, вместе взятых, порождает понятие о Вселенной, хотя смутное и в высшей степени неполное... Но бесконечность доступна созерцанию человека лишь в звездном небе, притом же, является в нем действительно, а не как гипотеза и предположение, а отсюда уже понятие об ней законным и необходимым образом распространяется на со-

вокупность жизненных и иных процессов в природе».

Витольд Карлович не участвовал в политической жизни страны: «Дело профессора – отдавать все силы своей кафедре, неуклонно выполнять свои нераздельные обязанности ученого и учителя». Когда Витольд Карлович получил в 1878 г. должность астронома-наблюдателя, то это позволило ему до известной степени быть в курсе университетских дел. Цераский считал университет сложнейшей формой учреждения, которое обеспечивает движение науки вперед, тогда как реакционный университетский Устав 1884 г. отменял выборность ректоров и деканов, превращал студентов в бесправных слушателей, а профессоров – в зависимых от администрации чиновников. Витольд Карлович очень остро переживал разгром ИМУ, который провел в 1911 г. министр просвещения Л.А. Кассо. В.К. Цераский присоединился к протестующим преподавателям и профессорам ИМУ, подавшим заявления об отставке. Но он сохранил за собой заведование Московской астрономической обсерваторией на Пресне и продолжал работать, пока позволяло здоровье. Однако состояние его в 1910 г. заметно ухудшилось: Витольду Карловичу все труднее было двигаться.

В 1916 г. В.К. Цераский в связи с болезнью отказывается от заведования обсерваторией, переезжает в Крым – в Феодосию. В 1917 г. он был почти неподвижен. Лидия Петровна, его жена – самоотверженный друг, всячески старалась помочь мужу физически и материально, она подрабатывала

Новый памятник на могиле В.К. и Л.П. Цераских на Ваганьковском кладбище в Москве. Установлен в июне 2009 г.

частными уроками. Денег не хватало, она не гнушалась поденной работой и продажей вещей на "толкучем" рынке. Неоценимую помощь Лидии Петровне в уходе за больным оказала ее родная племянница Е.В. Попова, день и ночь находившаяся возле больного. Особенно тяжелыми были 1919–1921 годы: из-за гражданской войны связь Феодосии с Москвой была прервана. Только осенью 1922 г., после ряда хлопот друзей, удалось перевезти Витольда Карловича из Крыма в Подмоскowie, к сыну – в поселок Мещерское Подольского уезда, где сын работал врачом. По ходатайству Московского университета Совет народных комиссаров назначил В.К. Цераскому усиленную пенсию. В Москве 11 мая 1924 г. астрономы тепло отметили его 75-летний юбилей. Торжественное заседание, организованное Всероссийским астрономическим союзом и Московскими астрономическими учреждениями, состоялось в большой аудитории Геологического Кабинета Университета под председательством директора Пулковской обсерватории А.А. Иванова (1867–1939). После юбилея В.К. Цераский прожил еще год и ушел из жизни 29 мая 1925 г. Его похоронили в Москве на Ваганьковском кладбище у церкви, не так далеко от старого здания обсерватории, в районе Пресни. В 2010 г. астрономы ГАИШ МГУ поставили на могиле новый памятник В.К. и Л.П. Цераским.

Витольд Карлович навсегда остался в истории Московского Городского Университета имени М.В. Ломоносова как талантливый ученый-астроном, прекрасный организатор и человек с твердой гражданской позицией. В.К. Цераский был членом-корреспондентом Санкт-Петербургской Академии наук (1914), заслуженным профессором Московского



университета (1909), членом четырех московских обществ, в том числе Московского общества испытателей природы (1910); редактором издания "Анналы Московской астрономической обсерватории" (1890–1903).

В.К. Цераский заслужил всемирную известность и признание зарубежных ученых своими работами по астрофотометрии и открытием переменных звезд. Его именем названы астероид № 807 и кратер на обратной стороне Луны. В Белоруссии, в городе Слуцке, 5 ноября 2014 г. на здании гимназии № 1, где в XIX в. учился В.К. Цераский, торжественно открыли Памятную доску в честь своего знаменитого земляка.

*кандидат физико-математических наук
Л.П. ГРИБКО,
Г.А. ПОНОМАРЁВА,
ГАИШ МГУ*

Борис Сергеевич Петропавловский

(К 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

В ряду пионеров ракетно-космической техники свое место по праву занимает инженер-артиллерист, Герой Социалистического Труда (посмертно), один из авторов снаряда для реактивного миномета "Катюша" Борис Сергеевич Петропавловский. Он был одним из первых организаторов и конструкторов ракетной техники в СССР.

Борис Сергеевич Петропавловский родился 14 (26) мая 1898 г. в Курске в семье полкового священника. В возрасте 12 лет он едет в Варшаву и поступает в Суворовский кадетский корпус, который заканчивает в 1915 г.; после чего – ускоренный курс Константиновского артиллерийского училища в Петрограде (выпуск 1 ноября 1915 г.) Молодой прапорщик артиллерии попадает на германский фронт Первой мировой войны, его назначают командующим зенитной батареей; за военные отличия он был награжден орденом Святого Станислава 3-й степени с мечами и бантом.

Демобилизовавшись, в 1918–1919 гг. исполняет обязанности секретаря Новоторжского уездного исполкома Совета рабочих и крестьянских депутатов. В феврале 1919 г. по офицерской мобилизации призван в Красную Армию и участвовал в боях; в сентябре был ранен. В 1920–1922 гг. он – командир батареи 54-го легкого артиллерийского дивизио-



Б.С. Петропавловский. Начало 1930-х гг.

на, переименованной в 1921 г. во 2-ю Вьючно-горную батарею. В июле 1922 г. назначен начальником Артиллерийской школы 2-й Кавказской стрелковой дивизии им. А.К. Стёпина. С февраля 1923 г. Б.С. Петропавловский – помощник командира легкого артиллерийского



Борис Петропавловский после окончания Суворовского кадетского корпуса. 1915 г.

ганизацией в СССР в области ракетной техники. Лаборатория создана в 1921 г. в Москве по инициативе инженера-химика, изобретателя и ученого Николая Ивановича Тихомирова (1859–1930) при Главном артиллерийском управлении РККА. В 1927 г. она перебазировалась в Ленинград, в 1928 г. получила наименование "Газодинамическая лаборатория", ее основа-

дивизиона 2-й Кавказской стрелковой дивизии им. А.К. Стёпина. Принимал участие в боях с белогвардейцами на Южном и Западном фронтах, а также в сражениях в Закавказье и Средней Азии.

В 1924 г. поступил в Артиллерийскую академию РККА им. Ф.Э. Дзержинского. Приказом РВС СССР с 1 сентября 1925 г. Артиллерийская академия была объединена с Военно-инженерной, и на их базе образована Военно-техническая академия, слушателем которой вместе со своими товарищами стал Б.С. Петропавловский. В 1929 г. он закончил полный курс Военно-технической академии РККА им. Ф.Э. Дзержинского по артиллерийскому факультету (баллистическое отделение) в Ленинграде, после чего был направлен в Газодинамическую лабораторию (ГДЛ), расположенную сначала в здании Главного Адмиралтейства, а с 1932 г. – в Иоанновском рavelине Петропавловской крепости.

ГДЛ была первой научно-исследовательской и опытно-конструкторской ор-



Прапорщик артиллерии Б.С. Петропавловский – участник Первой мировой войны. 1916 г.

телем и руководителем был Н.И. Тихомиров. Начиная с 1894 г., он занимался проблемой создания ракетных снарядов – "самодвижущихся мин реактивного действия". В 1912 г. представил проект такого снаряда. Изобретение Тихомирова получило положительную оценку профессора Н.Е. Жуковского. После создания лаборатории Николай Иванович сделал многое для создания ракетных снарядов: поданный им патент на рецептуру бездымного пороха и технологию изготовления шашек из него был получен в 1930 г., уже после его смерти.

В 1929–1930 гг. Борис Сергеевич работал ведущим инженером ГДЛ, несмотря на то, что оказался там специалистом по конструированию пороховых ракет. В нем сочетались одновременно талант исследователя и инженера-конструктора. Б.С. Петропавловский читал лекции о реактивных двигателях в Артиллерийской академии, которую сам незадолго до этого закончил как инженер-артиллерист. Примерно через полгода после прихода в ГДЛ молодой ученый стал заместителем начальника лаборатории. Он широко экспериментирует в сфере создания новых конструкций ракет, пытается применить их в разных областях техники. В то время в ГДЛ были разработаны снаряды активно-реактивного действия. Н.И. Тихомиров и его ближайший соратник по созданию ГДЛ, сотрудник Главного артиллерийского управления в 1915–1920 гг. В.А. Артемьев стреляли такими снарядами из обычного миномета.

Б.С. Петропавловский пошел по новому пути: он решил сконструировать чисто реактивный снаряд, который не только летел, но и стартовал под действием реактивной тяги. Как писал В.А. Артемьев, «лаборатория в 1930 г. приступила к разработке реактивных снарядов,



основанных только на одном реактивном принципе, откинув совмещение пуска ракеты со стрельбой миномета».

Весной 1930 г., после смерти Н.И. Тихомирова, Борис Сергеевич возглавил лабораторию. Он осуществлял основное техническое руководство всеми работами, независимо от проходивших позже должностных перемещений. Как вспоминал один из сотрудников ГДЛ В.С. Соколов, «это был человек богатырского телосложения: точь-в-точь Добрыня Никитич со знаменитой картины Васнецова "Богатыри"». Как большинство очень сильных людей, он был уравновешенным, корректным в обращении с коллегами, скрупулезно дисциплинированным по отношению к себе – и того же требовал от своих подчиненных. Он терпеливо выполнял обязанности администратора, которые откровенно "не переносил", будучи по своей сути изобретателем и конструктором экстра-класса... В одном из писем к жене Б.С. Петропавловский писал: *«Ты думаешь, что у меня теперь*



Группа сотрудников ГДЛ на испытательном полигоне. В центре – Б.С. Петропавловский. Начало 1930-х гг.

главным образом административная работа. Ну, нет! Я этой стороне уделяю минимум внимания и только в той мере, в какой это неизбежно. Главная же работа – научно-техническая... Мне удалось открыть нечто новое, которое я подтвердил опытом, что внесло целый переворот во всю нашу работу. Я страшно увлечен, вечерами и лежа утром в постели, обдумываю план работы на следующий день...». На проводимых им в ГДЛ регулярных научно-технических совещаниях он умел выявить главное, что мешало движению вперед; настойчиво и мастерски искал выход из положения, совершенно не терпел пустого многословия... Несмотря на то, что Борис Сергеевич имел солидный вес, выглядел он всегда подтянутым и стройным.

Но административная работа все же отнимала много времени, не позволяя

ему в полной мере использовать свои возможности инженера-экспериментатора. И только 15 июля 1931 г. по приказу заместителя наркома по военным и морским делам и председателя Реввоенсовета СССР, начальника вооружений РККА М.Н. Тухачевского его заместитель Н.А. Ефимов назначает нового начальника ГДЛ – Николая Яковлевича Ильина (оставляя его уполномоченным начальника Технического штаба вооружений РККА по Ленинграду), а Борис Сергеевич становится заместителем Н.И. Ильина по опытно-конструкторской части. Теперь Б.С. Петропавловский больше времени мог уделять своим научным исследованиям, опытам и экспериментам. Экспериментатору и исследователю Петропавловскому принадлежит ведущее место в тех разработках по пороховым двигателям, которые он вел совместно с военным ин-

Г.Э. Лангемак – один из ближайших товарищей Петропавловского по работе в ГДЛ. 1930-е гг.

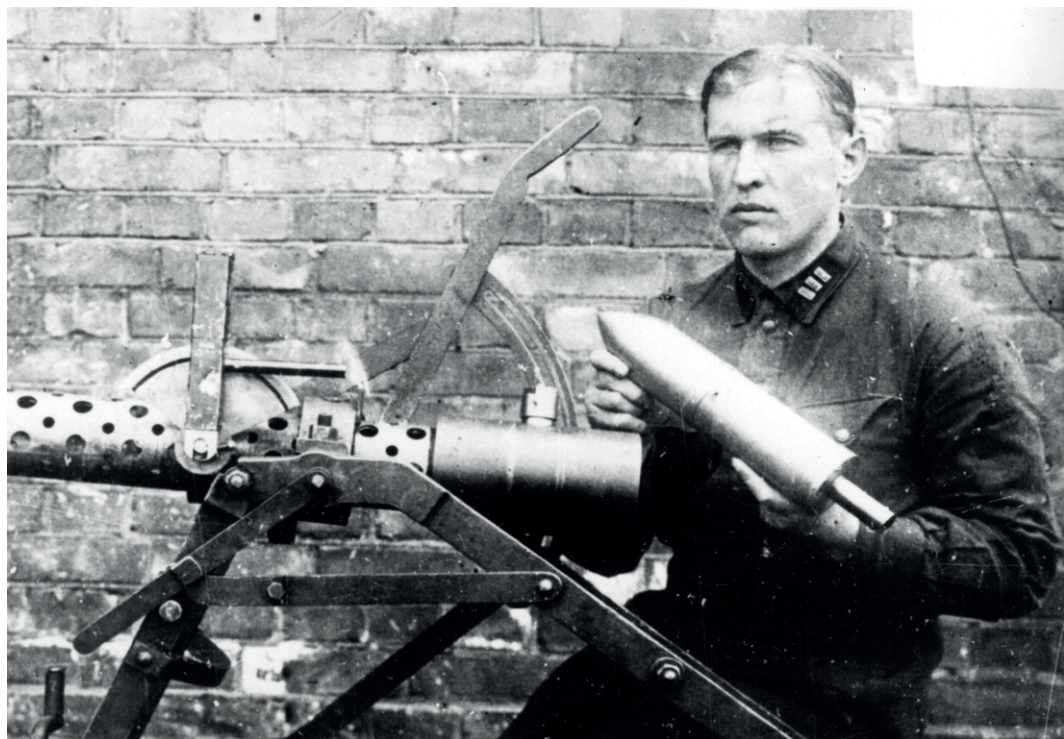
женером 1-го ранга Г.Э. Лангемаком, одним из пионеров ракетной техники, продолжая дело, начатое Н.И. Тихомировым и В.А. Артемьевым.

В ГДЛ пороховые ускорители применялись при взлете самолетов (У-1, ТБ-1 и других). Также были изготовлены ракетные снаряды разного калибра для стрельбы с самолетов и с поверхности земли. В 1930 г. под руководством Бориса Сергеевича были созданы осколочно-фугасные турбореактивные снаряды калибров 82 мм и 132 мм (РС-82 и РС-132) для боевых машин реактивной артиллерии БМ-8 и БМ-13. Затем сотрудники ГДЛ приступили к созданию оружия залповой стрельбы с применением пироксилино-тротилового пороха. За четыре года работы Б.С. Петропавловского в ГДЛ сотрудники лаборатории добились больших успехов в создании ракетных снарядов и легких пусковых установок для ведения огня с самолетов, автомобилей, танков и даже "с плеча". В 1933 г. в Газодинамической лаборатории были проведены официальные полигонные испытания с земли, морских судов и с самолетов девяти видов ракетных снарядов различных калибров на бездымном порохе конструкции Б.С. Петропавловского, Г.Э. Лангемака и В.А. Артемьева. Четыре из них были приняты на вооружение. А всего было разработано 82 типа реактивных снарядов калибром 82, 132 и 240 мм. Испытания проходили на полигонах Ленинграда и Евпатории в присутствии членов комиссии Реввоенсовета СССР под председательством М.Н. Тухачевского.

В проводимые работы основной конструкторский вклад внесли сотрудники ГДЛ Н.И. Тихомиров, В.А. Артемьев, Б.С. Петропавловский и Г.Э. Лангемак. По пред-



ложению В.А. Артемьева, поддержанного Борисом Сергеевичем и одним из организаторов и руководителей разработок ракетной техники И.Т. Клейменовым (ставшим в декабре 1932 г. начальником ГДЛ), в лаборатории в 1933 г. отказались от турбореактивного принципа стабилизации полета снарядов и вернулись к применению снарядов "с оперением". С новой конструкцией стабилизаторов удалось достичь необходимой меткости залповой стрельбы. Шесть снарядов РС-82 "с оперением" (по 3 штуки в каждом пакете) укладывались на направляющих, закрепленных между собой бугелям (вместо ранее применявшихся трубчатых приспособлений). Залповые стрельбы с бугельных направляющих на земле и с самолета были выполнены в 1933 г. Б.С. Петропавловским. С этого момента можно было считать, что задача осуществления залповой стрельбы ракетами на бездымном



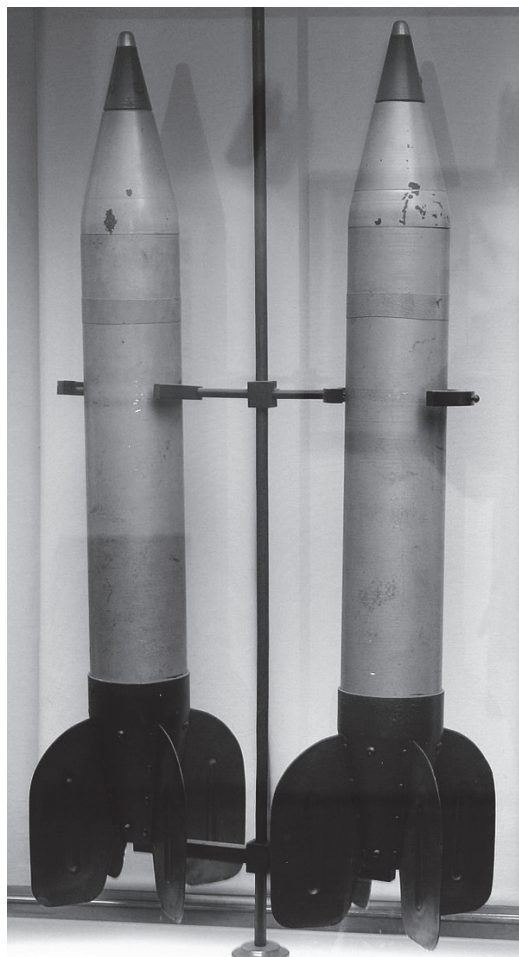
Б.С. Петропавловский у пусковой установки для 82-мм реактивных снарядов. Начало 1930-х гг.

порохе была впервые разрешена не только для авиации, но и для пехоты. Ясно, что пусковое приспособление со снарядами можно было легко перенести с самолетов на автомашины, тракторы, танки, на палубы кораблей.

Одним из направлений деятельности Бориса Сергеевича в это же время стало создание реактивной противотанковой пушки (изготовлена в 1931 г.); в реактивном двигателе применялся многошашечный заряд из пироксилино-тротилового пороха. Этот заряд, по его предположению, должен был гореть в постоянном объеме с истечением газов, что оказалось более эффективным, чем работа динамореактивной пушки профессора Д.П. Рябушинского (ученый в области гидроаэродинамики, основатель Аэродинамического института), в которой заряд горел в переменном объеме, с истечением газов.

Только в годы Второй мировой войны исследователи в США и Германии пошли по пути, избранному Б.С. Петропавловским. В 1942 г. американцы получили противотанковое реактивное оружие "Базука", а в Германии в 1943 г. было применено такое же оружие – "Оффенрор". В пушке Петропавловского применялась перфорированная труба: за счет созданной реакции (от истечения газов из реактивной камеры) снаряд двигался сначала по открытой трубе, затем – в воздухе. Горение шашечного заряда продолжалось на протяжении всего "активного участка" траектории полета снаряда.

Б.С. Петропавловский со своими коллегами занимался разработкой реактивных снарядов РС-82 мм и РС-132 мм; их конструкция в основе своей сохранилась до момента принятия ее на вооружение в Красной Армии. Позднее в Реактивном



Ракетные снаряды РС-132 для машин реактивной артиллерии БМ-13.

научно-исследовательском институте (РНИИ, 1933–1942; Земля и Вселенная, 2007, № 5; 2013, № 5) эти снаряды были доработаны для гвардейских реактивных минометов БМ ("Катюша"), которые использовались в годы Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. Но, безусловно, значителен и важен вклад Б.С. Петропавловского, который он внес в начале 1930-х гг. в создание реактивных снарядов для "Катюш".

После создания (в сентябре 1933 г.) на базе ГДЛ и московской Группы изучения реактивного движения (ГИРД, 1931–1933; Земля и Вселенная, 1981, № 5; 1993, № 5) первого в мире специализированного учреждения по разработке

ракетной техники (РНИИ), директором которого был назначен начальник Газодинамической лаборатории И.Т. Клеймёнов, заместителем – начальник ГИРД С.П. Королёв. С сентября по ноябрь 1933 г. Б.С. Петропавловский назначен главным инженером Ленинградского отделения РНИИ.

Борис Сергеевич простудился во время испытаний реактивных снарядов на полигоне и умер 6 ноября 1933 г. от скоротечной чахотки. Он похоронен на Смоленском кладбище в Ленинграде.

Официальное признание творческого вклада Б.С. Петропавловского, И.Т. Клеймёнова и других участников созданного знаменитого реактивного оружия Второй мировой войны – реактивного миномета "Катюша" – произошло только в 1991 г. Указом Президента СССР М.С. Горбачёва от 21 июня 1991 г. «За выдающиеся заслуги в укреплении оборонной мощи нашего государства и большой личный вклад в создание отечественного реактивного оружия» Н.И. Тихомирову, И.Т. Клеймёнову, Г.Э. Лангемаку, Б.С. Петропавловскому, В.Н. Лужину и Б.М. Слонимеру посмертно были присвоены звания Героев Социалистического Труда.

Вместе с Б.С. Петропавловским в ГДЛ работал будущий выдающийся ученый и конструктор в области жидкостных ракетных двигателей, главный конструктор двигателей первых в мире космических ракет-носителей академик В.П. Глушко, а также В.А. Артемьев, И.Т. Клеймёнов, Г.Э. Лангемак и другие исследователи-пионеры, положившие начало созданию ракетной техники в СССР.

Хотя сам Борис Сергеевич занимался, в первую очередь, твердотопливными ракетными снарядами, но он считал, однако, что «основной задачей при разработке ракетной проблемы является задача



Могила Б.С. Петропавловского на Смоленском кладбище Санкт-Петербурга.

создания мощного и надежно действующего ракетного мотора на жидком топливе... Ракетный мотор на жидком топливе – это мотор современной, наиболее передовой техники». В.П. Глушко высоко ценил его содействие в развитии работ по созданию первых отечественных экспериментальных ЖРД семейства ОРМ (опытный ракетный мотор).

Б.С. Петропавловский принимал активное участие в организации РНИИ, участвуя в совещаниях различного уровня вместе со своими коллегами: Н.Я. Ильи-

ным, Г.Э. Лангемаком, И.Т. Клейменовым и В.П. Глушко, и предлагая создать в нашей стране Реактивный научно-исследовательский институт на базе ГДЛ. Это предложение было поддержано М.Н. Тухачевским.

В декабре 1935 г. вышла в свет книга «Ракеты: их устройство и применение» (М.–Л.: ОНТИ НКПТ, Главная редакция авиационной литературы), написанная Г.Э. Лангемаком и В.П. Глушко. Книга была запрещена после ареста авторов и изъята из фондов в 1938 году.

История создания этой книги тесно связана с Б.С. Петропавловским: именно ему принадлежала мысль о ее написании. Еще в середине 1933 г. он

Обложка книги Г.Э. Лангемака и В.П. Глушко «Ракеты: их устройство и применение». Вышла в свет в 1935 г., издание было предложено Б.С. Петропавловским.





предлагал В.П. Глушко и Г.Э. Лангемаку написать книгу о ракетной технике и даже привлек их для разработки ее плана. Коллеги написали эту книгу в память о Борисе Сергеевиче – она вышла в свет в декабре 1935 г. Об этом авторы сказали в предисловии: «Безвременная кончина (Петропавловского) в том же году (1933 г.) не дала ему возможности принять участие в дальнейшей работе. Светлой памяти этого талантливого инженера и чудесного товарища авторы посвящают свой скромный труд».

Мемориальная доска на здании Иоанновского рavelина в Петропавловской крепости, где в 1932–1933 гг. размещалась ГДЛ.

Б.С. Петропавловский ушел из жизни в 35 лет, когда его инженерный талант и интеллектуальные способности ученого-исследователя продолжали раскрываться и отнюдь еще не достигли предела. Многое еще мог совершить этот талантливый инженер, но его вклад в работы по созданию реактивных снарядов для прославленных «катюш» навеки останется в памяти многих поколений наших соотечественников!

Именем Б.С. Петропавловского в 1967 г. по инициативе академика В.П. Глушко был назван древний кратер диаметром 64,1 км и глубиной 2,7 км на обратной стороне Луны, в ее Северном полушарии (координаты: 36,92° с.ш., 115,28° з.д.).

На здании Иоанновского рavelина в Петропавловской крепости – там, где размещалась ГДЛ, установлена мемориальная доска.

СУДАКОВ В.С.,

член-корреспондент

Российской академии космонавтики

им. К.Э. Циолковского

РАХМАНИН В.Ф.,

кандидат технических наук

АО «НПО Энергомаш имени академика

В.П. Глушко»

Открыто новое окно во Вселенную (российский вклад)

*Из всех услуг, которые могут быть
оказаны науке, введение новых идей –
самая важная.*

Дж. Дж. Томсон

В науке важную роль играет первоначальная оригинальная идея. В 1962 г. два советских физика Михаил Евгеньевич Герценштейн (1926–2010 гг., выпускник кафедры физики колебаний МГУ) и Владислав Иванович Пустовойт (выпускник Днепропетровского университета), опубликовали в "Журнале экспериментальной и теоретической физики" (Т. 43. № 2. С. 605–607) статью "К вопросу об обнаружении гравитационных волн малых частот". В ней для регистрации долгое время казавшихся неуловимыми гравитационных волн предлагался оригинальный оптический метод с использованием только что созданного лазера и классического интерферометра Майкельсона. Слово "лазер" в их статье было взято в кавычки, поскольку этот термин в 1962 г. еще не стал общепринятым. Нобелевскую премию "за фундаментальные работы в области квантовой электроники, приведшие к созданию генераторов и усилителей на основе принципа мазера-лазера" Н.Г. Басову, А.М. Прохорову и Ч. Таунсу (США) присудили только в 1964 г. Это позволило существенно

повысить чувствительность измерений, выбрать единственно правильный путь и решить поставленную задачу.

14 сентября 2015 г. участник проекта, сотрудник Университета Флориды профессор Сергей Клименко (выпускник Новосибирского госуниверситета, работавший в Институте ядерной физики



Нобелевские лауреаты А.М. Прохоров, Ч. Таунс (США) и Н.Г. Басов. 1964 г.

Сибирского отделения РАН) совершенно неожиданно получил экстренное электронное сообщение с установок LIGO (от англ. Laser Interferometry Gravitational wave Observatory – лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория; Земля и Вселенная, 2016. № 4) и сразу все понял: "первая ласточка прилетела" – "полезный сигнал принят"! Это была редчайшая удача, так как усовершенствованная методика (AdvLIGO) только что начала функционировать в новом, более чувствительном режиме. Отметим важную роль Сергея Клименко в разработке сложнейшей компьютерной программы для обработки результатов постоянного "прослушивания" Вселенной и подавления шумов различной природы мощности. С помощью его алгоритма анализа сигналов оказалось возможным выделять нужную информацию, что и позволило обнаружить гравитационные волны (Земля и Вселенная, 2014. № 4. С. 110; 2016. № 6. С. 36).

ЧТО ТАКОЕ ГРАВИТАЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР?

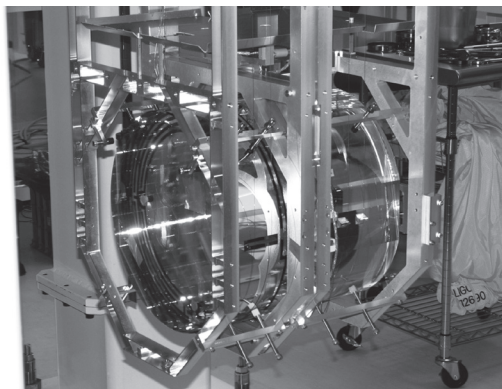
Вернемся к схеме интерферометра Майкельсона – основе лазерного детектора гравитационных волн. Каждый детектор представляет собой Г-образную конструкцию из двух тоннелей. Луч лазера расщепляется на два перпендикулярных луча, которые попадают в "свой" тоннель и, многократно отражаясь от зеркал, расположенных на расстояниях в 4 км от светоделителя, возвращаются и попадают на фотоприемник; при сложении этих лучей образуется картина из множества полос. Гравитационная волна вызывает колебания цилиндров, к которым прикреплены зеркала; это изменяет рисунок полос. Сигнал на выходе

Детектор гравитационных волн обсерватории LIGO.



Профессор Сергей Клименко – создатель алгоритма анализа сигналов гравитационных волн, возникших от слияния черных дыр или нейтронных звезд (на втором плане).

де детектора зависит от разности фаз в лучах, которая, в свою очередь, зависит от разности пройденных ими путей. Современные компьютеры позволяют обнаружить эти микроскопические (10^{-19} м) смещения (диаметр протона на 4 порядка больше!). Для того чтобы увеличить «набег» фазы, в каждом плече установлены дополнительные зеркала, образующие резонаторы Фабри–Перо; таким образом лучи 300 раз "пробегают" 4 км в каждом направлении, прежде чем попадают в фотоприемник. Диапазон частот, которые регистрируют детекторы LIGO, составляет от десятков герц до





Академик В.И. Пустовойт на пресс-конференции в ИКИ РАН. 16 октября 2017 г.

нескольких килогерц. Необходимо измерять очень малые колебания зеркал в этом диапазоне; следовательно, главной проблемой при разработке детектора является снижение всех видов шумов (именно поэтому зеркала подвешиваются на сложном, многоступенчатом фильтре, подавляющем эти колебания). Лучи света распространяются внутри труб, где поддерживается глубокий (10^{-9} мм рт. ст.) вакуум. Поскольку свет имеет квантовую природу и состоит из отдельных частиц – фотонов, существует особый вид флуктуаций – фотонный дробовой шум. Для уменьшения его влияния увеличивают интенсивность света в интерферометре: в детекторах второго поколения AdvLIGO, которые и привели к открытию, мощность лазера составляет от 15 до 100 Вт, а эффективная мощность внутри интерферометра (с учетом накопления в резонаторах и использования так называемой рециркуляции света) достигает одного мегаватта! Важнейшим фактором, ограничивающим чувствительность детектора, является броуновский шум – результат теплового движения атомов и молекул. Для его снижения были разработаны монолитные кварцевые подвесы зеркал.

Гравитационный детектор – сложное устройство, в котором использованы уникальные компоненты, в том числе созданные специально для него в раз-

личных (в том числе и российских) лабораториях мира. Достаточно сказать, что покрытие зеркал таково, что из каждого миллиона падающих фотонов "теряется" при отражении лишь один, настройку положения зеркал и других оптических элементов обеспечивают более 5 тыс. следящих систем, а для обработки поступающей информации (порядка терабайта в сутки) – 1000-процессорные группы компьютеров, объединенных высокоскоростными каналами связи, и глобальная распределенная вычислительная сеть. Волны обнаруживаются по смещению полос оптического интерферометра.

Существование гравитационных волн предсказал создатель общей теории относительности (ОТО) Альберт Эйнштейн в 1916 г., и ровно через 100 лет, в феврале 2016 г. было объявлено об их экспериментальном открытии. Сразу значительно вырос интерес общества (и особенно молодежи) к современной науке (радио, ТВ, пресса), и активные участники эпопеи – ученые – включились в эту кампанию. Так Кип Торн участвовал в создании научно-популярного фильма "Interstellar" (Межзвездный; 2014 г.), неожиданно ставшего бестселлером.

В России, к сожалению, успехи в этом направлении более скромные: директор Центра уникальных приборов и установок РАН академик В.И. Пустовойт в обстоятельной лекции "Лазерные интерферометры для непосредственного обнаружения гравитационных волн", прочитанной им перед студентами и преподавателями МИЭТ (г. Зеленоград) в апреле 2016 г., подробно остановился на обнаружении гравитационных волн: от формул Эйнштейна до новейших технологий и приборов (запись лекции: <https://youtu.be/ZLvNesxObIQ>).

Над обнаружением гравитационных волн в составе LIGO работали две группы российских ученых. Первая – из Московского университета, созданная на физическом факультете и руководимая долгие годы членом-корреспондентом РАН профессором Владимиром Борисовичем Брагинским (1931–2016). Он и его группа предложили концепцию зеркал для проведения эксперимента. Владимир Борисович хорошо понимал, что проведение полномасштабных работ по обнаружению гравитационных волн в то время в университете не представлялось возможным; он пошел по пути разработки методов и приборов регистрации сверхслабых сигналов, которые в конечном счете потребовались для обнаружения гравитационных волн. Приборы должны были обладать огромной чувствительностью и быть "малошумящими"; при этом был решен ряд важнейших проблем, направленных на максимальное повышение чувствительности гравитационно-волновых детекторов, выявление их термодинамических и квантовых ограничений. Результаты этих работ и были использованы при создании сверхчувствительных детекторов, позволивших провести регистрацию гравитационных волн.

В.Б. Брагинский предложил использовать в качестве "подвеса" для пробных масс вместо металлической кварцевую нить. На эту мысль его натолкнули опыты, проведенные в начале XX в. профессором Московского университета Петром Николаевичем Лебедевым: он использовал стеклянную нить в опытах по измерению давления света (прибор Лебедева хранится в музее физического

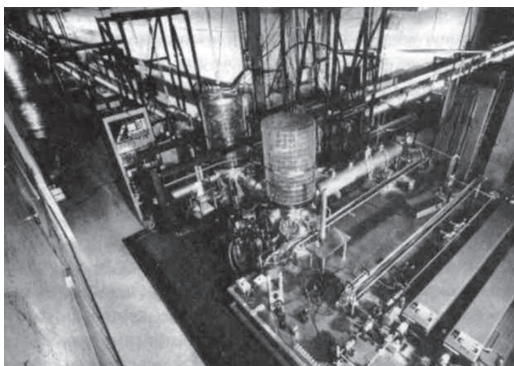


Член-корреспондент РАН В.Б. Брагинский и профессор К. Торн. 2000-е гг.

факультета и поныне). Нить из плавленного кварца оказалась не только лучше металлической, но и нити из сапфира, и по своим свойствам кварц вообще оказался наилучшим материалом. При кварцевых подвесах отсутствуют избыточные механические шумы, что особенно важно в случае, когда речь идет о сверхслабом сигнале.

Ученый предсказал существование нескольких физических эффектов, в част-

40-м прототип интерферометра по поиску гравитационных волн, созданный в Калифорнском технологическом институте. Около 1989 г.





Выступает руководитель московской группы LIGO доктор физико-математических наук В.П. Митрофанов. МГУ, 2016 г.

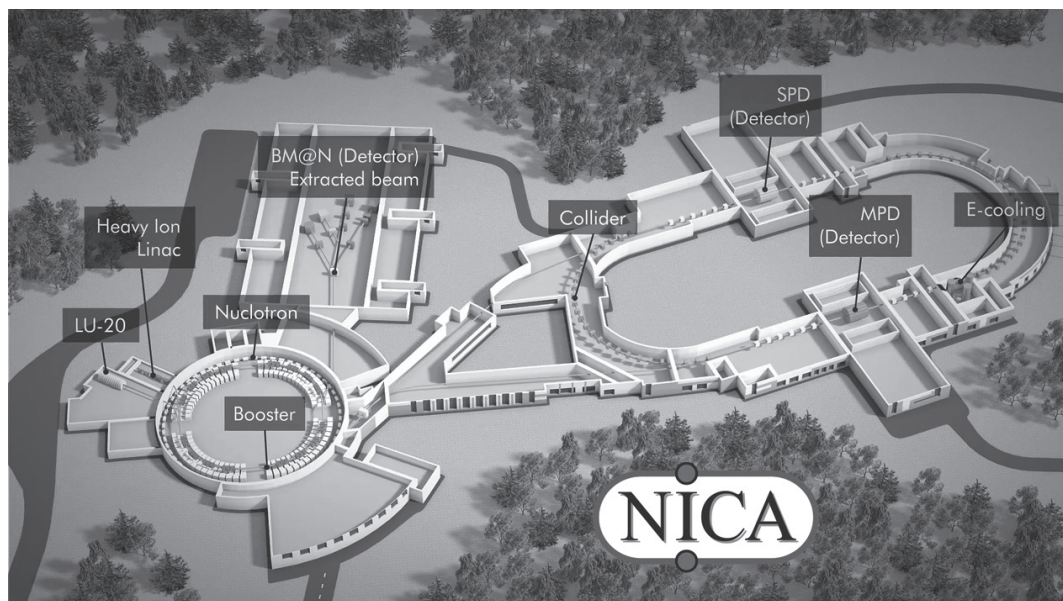
ности стандартного квантового предела (1967 г.), спин-квадрупольного гравитационного эффекта (1980 г.) и трение, порождаемое нулевыми колебаниями вакуума (1991 г.). Владимир Борисович начал сотрудничать с К. Торном с 1968 г. по инициативе последнего, когда ученый посетил Лабораторию гравитационных исследований на физическом факультете МГУ. Поначалу К. Торн не был убежден, что гравитационные волны можно зафиксировать, однако разговоры с В.Б. Брагинским, а также результаты исследований американского ученого Райнера Вайса, который в 1972 г. предложил искать гравитационные волны с помощью лазерного интерферометра, вдохновили К. Торна (спустя 10 лет после работы М.Е. Герценштейна и В.И. Пустовойта) на продолжение эксперимента!

В 1976 г. К. Торн решил начать опыт по поиску гравитационных волн в Калифорнийском технологическом институте. Владимир Борисович отказался переезжать в США и стал научным консультантом группы. Уже в 1983 г. был построен 40-метровый прототип будущего интерферометра. В это же время ученые из Массачусетского технологического института задумались о создании киломе-

тровых интерферометров. В 1984 г. исследователи из двух институтов – К. Торн, Р. Вайсс и Р. Древер – объединились и решили создать LIGO (проект предложен в 1992 г.). Группа В.Б. Брагинского через несколько лет официально вошла в это объединение; членами этой группы (при участии профессора физического факультета Арсения Александровича Соколова – известного специалиста в области квантовой теории) была развита теория и разработаны новые методы квантовых измерений; установлен предел чувствительности в экспериментах с пробными свободными массами (стандартный квантовый предел) и было показано, что чувствительность гравитационной антенны с малой диссипацией близка к квантовому пределу. В МГУ под руководством нынешнего наставника московской группы LIGO профессора Валерия Павловича Митрофанова (ученика и сотрудника В.Б. Брагинского) и Леонида Георгиевича Прохорова были детально исследованы шумы от электрических зарядов на кварцевых зеркалах детекторов. Дело в том, что движущиеся заряды генерируют паразитные шумы, поэтому были найдены режимы медленного "растекания" зарядов, наиболее благоприятные для проведения измерений; при этом ученые обнаружили новую разновидность термодинамических шумов в зеркалах детектора.

Итак, фундаментальные открытия, сделанные замечательным российским ученым В.Б. Брагинским и его коллегами (квантовые пределы, способы квантовых измерений и квантовые флуктуации), оказались нужны и востребованы в проекте LIGO.

Долгое время экспериментаторы шли по неправильному пути: Дж. Вебер даже объявил об успешном наблюдении гра-



Модель ускорительного комплекса коллайдера мегапроекта NICA, создающегося на базе Лаборатории физики высоких энергий и Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Строительство идет, начиная с 2013 г. Представленные детекторы MPD и SPD предназначены для экспериментов в области релятивистской ядерной физики и изучения спина при столкновениях пучков ядер легких элементов.

витационных волн, используя подвешенный в вакууме полутонный алюминиевый цилиндр, который был увешан чувствительными датчиками колебаний. В.Б. Брагинский, однако, экспериментально показал ошибку в 6 порядков. Среди ученых стал расти скепсис, вспомнили слова А. Эйнштейна о невозможности обнаружения столь слабых сигналов, однако это не означало, что волн не существует в природе (как стали думать многие физики после ряда неудач). В 1973 г. американские физики, лауреаты Нобелевской премии по физике 1993 г. Рассел Халс и Джозеф Тейлор представили косвенное доказательство существования гравитационных волн. Такое заключение ими сделано после обнаружения двойного пульсара PSR B1913+16 из факта потери энергии пульсарами. При приближении звезд

друг к другу происходит изменение частоты, что и позволило судить о существовании гравитационных волн, но это было не прямое, а всего лишь косвенное свидетельство существования загадочных волн.

Будучи великолепным физиком-экспериментатором, В.Б. Брагинский создал научную школу, хорошо известную в нашей стране и за рубежом своими фундаментальными физическими исследованиями. Восхождение к "эвересту" современного эксперимента по детектированию гравитационных волн Владимир Борисович начал в 1955 г., работая над проблемами взаимной синхронизации клистронов и применением переходного излучения в СВЧ-электронике. В 1965 г. он первым обратил внимание на существование в экспериментах с пробными телами весьма значительного потенциального ре-

зерва чувствительности, когда трения в измерительном осцилляторе достаточно мало, так что время релаксации много больше времени измерения. В этом случае можно регистрировать изменение энергии в осцилляторе, значительно меньшее равновесной тепловой энергии, что и продемонстрировал В.Б. Брагинский в блестящих экспериментах. Ученый предсказал существование предела чувствительности координатных измерений квантового происхождения (теперь он называется стандартным квантовым пределом), предложил и обосновал принципы нового класса измерений – квантово-невозмущающих измерений.

Плодотворная научная и педагогическая деятельность Владимира Борисовича снискали ему заслуженное уважение в физическом сообществе. Он был награжден Золотой медалью им. П.Н. Лебедева, медалью Ф. Шиллера от Йенского университета (Германия), стал лауреатом международных премий – Фэйрчайлда (США) и Гумбольдта (Германия), почетным зарубежным членом Американской Академии искусств и наук, членом Европейской академии, иностранным членом Национальной академии наук США. Выдающийся ученый, профессор Кафедры физики колебаний физического факультета МГУ, член-корреспондент РАН В.Б. Брагинский ушел от нас на 85-м году жизни – зная, что триумфально воплотил в жизнь поставленные цели. Дело В.Б. Брагинского продолжается: 25 марта 2017 г. в Дубне был заложен первый камень сооружения коллайдера NICA (Nuclotron-based Ion Collider facility – коллайдер протонов и тяжелых ионов) – одного из международных мегапроектов, строящийся с 2013 г. на базе Лаборатории физики высоких энергий и Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Работа ускорителя должна "пролить свет" на возникновение Вселенной, происходящие процессы в ней и природу гравитационных волн.

ВКЛАД НИЖЕГОРОДЦЕВ В ОТКРЫТИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Еще одна группа российских ученых – сотрудники Института прикладной физики (ИПФ) РАН (Нижний Новгород) – входит в объединение LIGO и работает под руководством Президента РАН академика А.М. Сергеева, члена-корреспондента РАН Е.А. Хазанова и других. Именно в этом городе возникла знаменитая на весь мир выдающаяся школа отечественной радиофизики. Базой послужила Нижегородская радиолaborатория (НРЛ), открытая в 1918 г. Научно-исследовательская деятельность НРЛ заложила основы радиосвязи, радиотехники, радиолокации, электроники, радиовещания, радио- и электронной промышленности, изучения ионосферы. В НРЛ были собраны первоклассные специалисты: М.А. Бонч-Бруевич, В.К. Лебединский, А.Ф. Шорин, Д.А. Рожанский, В.П. Вологдин, братья Б.А. и Г.А. Остроумовы, А.М. Кугушев, А.А. Пистолькорс, О.В. Лосев, С.И. Шапошников и другие. Кроме того, на дважды проведенных конгрессах Ассоциации физиков бывали Л.И. Мандельштам, Н.Д. Папалекси, В.А. Стеклов, О.Д. Хвольсон. На радиофизическом факультете Горьковского госуниверситета преподавал лауреат Нобелевской премии, научный сотрудник Московского физического института им. П.Н. Лебедева академик В.Л. Гинзбург (1916–2009; Земля и Вселенная, 2010, № 2).

В области теории колебаний (значение которой для физики и техники выходит далеко за пределы радиотехники) были достигнуты столь значительные успехи, что полученные результаты можно с полным правом отнести к числу наиболее ярких достижений советской физики. Выдающуюся роль в этих достижениях сыграли работы Л.И. Мандельштама, Н.Д. Папалекси и их научной школы. Достижения нижегородской школы – одного из мировых центров,

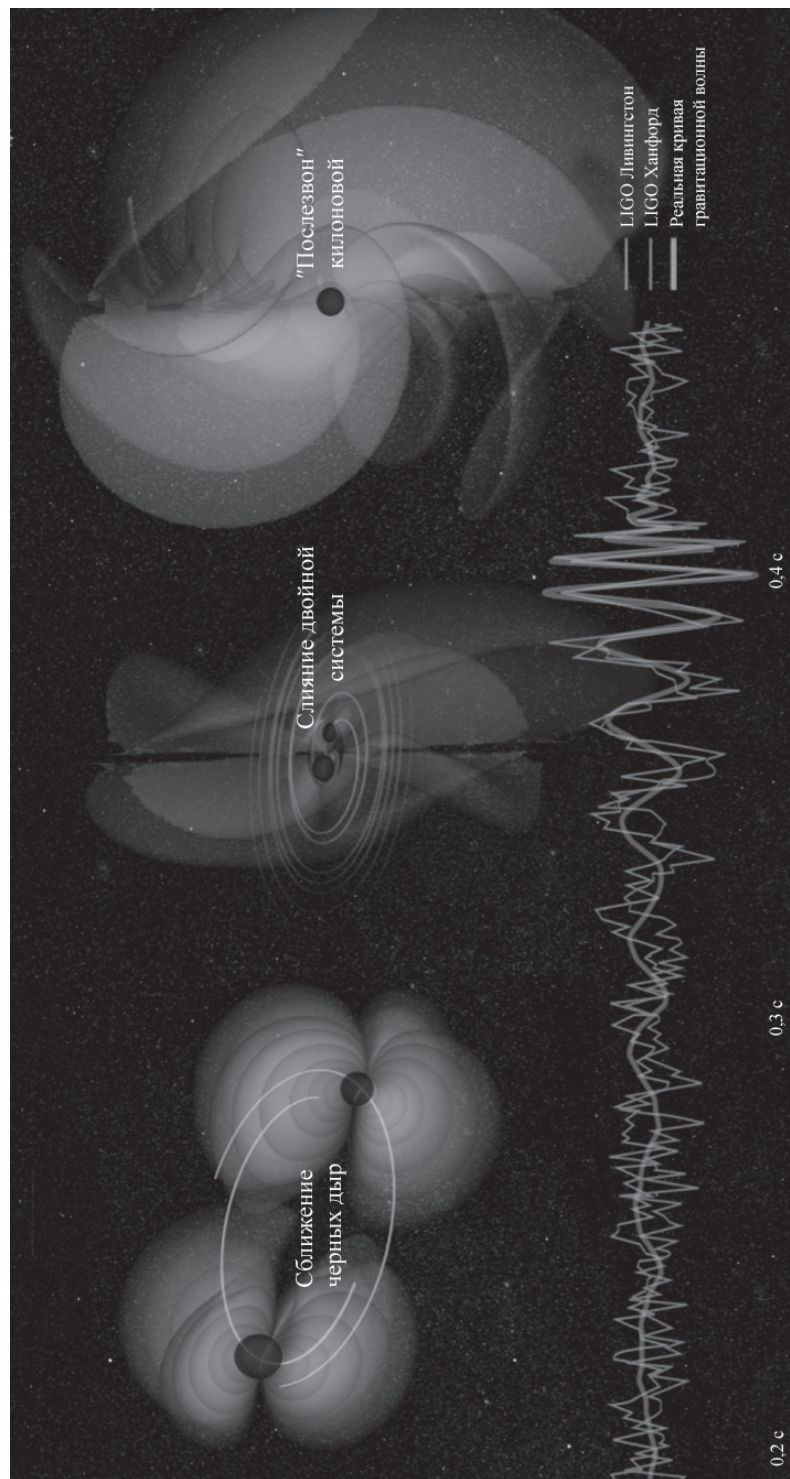
работающих в ведущих направлениях радиофизики, лазерной физики, нелинейной оптики, физики атмосферы и ионосферы – получили высокую оценку и признание как в нашей стране, так и за рубежом. Поэтому становится понятным значение Нижнего Новгорода в развитии самых передовых направлений в современной физике (в том числе и в уникальном проекте LIGO) – в особенности в будущем усовершенствовании и модернизации лазерно-оптической аппаратуры.

Наиболее существенным вкладом ИПФ РАН в создании детекторов LIGO является изобретение уникальных, уже упоминавшихся изоляторов Фарадея, работающих при большой мощности лазерного излучения. Поглощение излучения в магнитоактивной среде неизбежно приводит к ее нагреву и термонаведенным поляризационным и фазовым искажениям лазерного пучка. Был проведен анализ всех искажений лазерного пучка с точки зрения ухудшения параметров "изолятора" и определены механизмы и ключевые физические величины, отвечающие за различные виды искажений. Были предложены и осуществлены методы компенсации и подавления паразитных тепловых эффектов. Сотрудники ИПФ не только разработали и изготовили уникальные изоляторы Фарадея, но и установили их на детекторы LIGO. Без оптических изоляторов, которые изобрели в Институте прикладной физики РАН, "пространственно-временную рябь" не удалось бы зафиксировать.

В настоящее время в Нижнем Новгороде разрабатывается лазер для детектора гравитационных волн следующего поколения. В 2016 г. участникам проекта была присуждена престижная международная премия Грубера по космологии, а также Премия по фундаментальной физике, учрежденная российским бизнесменом Юрием Мильнером.

Наблюдения на установках LIGO (США) и Virgo (Италия) позволили позиционировать источник гравитационных волн в пределах обширного участка Южного полушария звездного неба размером в несколько сотен дисков полной Луны, содержащего миллионы звезд. 17 августа 2017 г. впервые в истории удалось осуществить одновременную регистрацию гравитационных волн, оптического и гамма-излучений, возникающих при слиянии системы нейтронных звезд массами 1,7 и 1,1 $M_{\odot}$; в результате образовалась килоновая AT 2017gfo (GW170817) массой 2,8 $M_{\odot}$. Событие GW170817, произошедшее в линзообразной галактике NGC 4993 в созвездии Гидры (130 млн св. лет от нас), было зафиксировано двумя детекторами гравитационных волн LIGO и Virgo, космическими гамма-обсерваториями "Ферми" и "Интеграл", телескопами Европейской Южной Обсерватории (ESO), системой телескопов "МАСТЕР" (Земля и Вселенная, 2014, № 3, с. 109–110). О регистрации гравитационных волн было официально объявлено 16 октября 2017 г. в совместном пресс-релизе LIGO и Virgo, в этот же день прошла пресс-конференция в ИКИ РАН. Ранее были детектированы гравитационно-волновой всплески при слиянии сверхмассивных черных дыр: GW150914 (14 сентября 2015 г.), GW151226 (25 декабря 2015 г.), GW170104 (4 января 2017 г.) и GW170608 (8 июня 2017 г.).

Очередная, пятая по счету, регистрация гравитационных волн кардинально отличалась от предыдущих – на этот раз, анализируя полученный сигнал, стало ясно, что источником волн стало не столкновение черных дыр, а слияние нейтронных звезд. Благодаря его большей длительности специалисты успели "поймать" не только гамма-всплески, но и оптическое (а спустя некоторое время и радиоизлучение), что позволило впервые определить координаты произошедшего



Этапы слиянии двух очень компактных объектов – черных дыр массами $30,5$ и $25,3 M_{\odot}$, в результате образовалась новая черная дыра массой $53,2 M_{\odot}$. Это событие (GW150914) произошло 14 сентября 2015 г. и создало гравитационные волны, которые были впервые зарегистрированы (на рисунке внизу) двумя наземными лазерными интерферометрами LIGO (США) и Virgo (Италия). Рисунок LIGO.



Пресс-конференция в ИКИ РАН: А.А. Лутовинов, В.И. Пустовойт, С.П. Вятчанин и В.П. Митрофанов. 16 октября 2017 г.

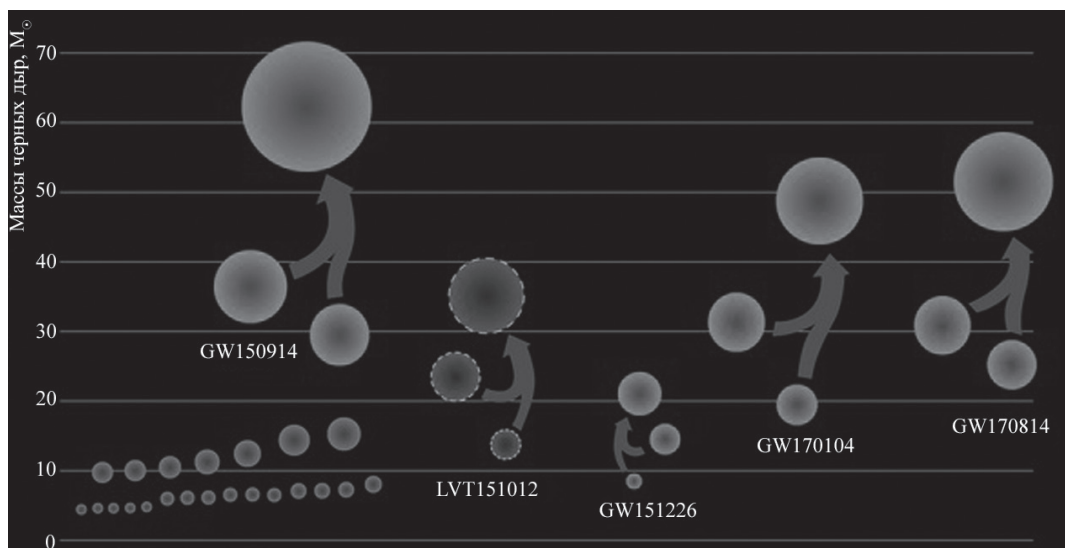


Схема слияния массивных черных дыр GW150914 (14 сентября 2015 г.), GW151226 (25 декабря 2015 г.), GW170104 (4 января 2017 г.) и GW170608 (8 июня 2017 г.).

события. Оценки расстояния до объекта, полученные как из анализа гравитационно-волновых данных, так и в результате других наблюдений, дали согласующиеся результаты: GW170817 находится на том же расстоянии от Земли, что и галактика NGC 4993 – в 130 млн св. лет. Таким образом, это – ближайший к нам из всех обнаруженных источников гравитационных волн и один из ближайших когда-либо наблюдавшихся источников гамма-всплесков.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Гравитационные волны (ГВ) – "рябь" пространства–времени, распространяющиеся со скоростью света от слияния черных дыр (ЧД) или нейтронных звезд, надежно зафиксированы, а их характеристики определены. Отметим, что они стали следствием уравнений Общей теории относительности (ОТО) А. Эйнштейна, хотя о возможности распространения в пространстве "волн гравитации" писал еще А. Пуанкаре в 1905 г. Свойства ГВ-сигнала от сливающихся двойных ЧД находятся в согласии (с точностью до нескольких процентов) с ОТО. Следует отметить, что уже из существующих измерений получены новые ограничения на поправки к теории, которые невозможно было получить ранее, и новые феноменологические ограничения на возможную массу гравитона.

Полученные результаты наблюдений слияний ЧД привели к основному выводу: двойные ЧД существуют. Предложено несколько каналов их образования: естественная эволюция массивных двойных звезд; динамическое образование пар массивных ЧД в плотных звездных скоплениях; образование пар ЧД при несимметричном коллапсе ядра одиночных массивных быстровращающихся звезд; "экзотические" сценарии, включая образование пар первичных массивных ЧД (пока не исключены различные каналы образования наблюдавшихся источников); кроме массы компонент, измерения ГВ-сигнала при слияниях двойных ЧД позволяют поло-

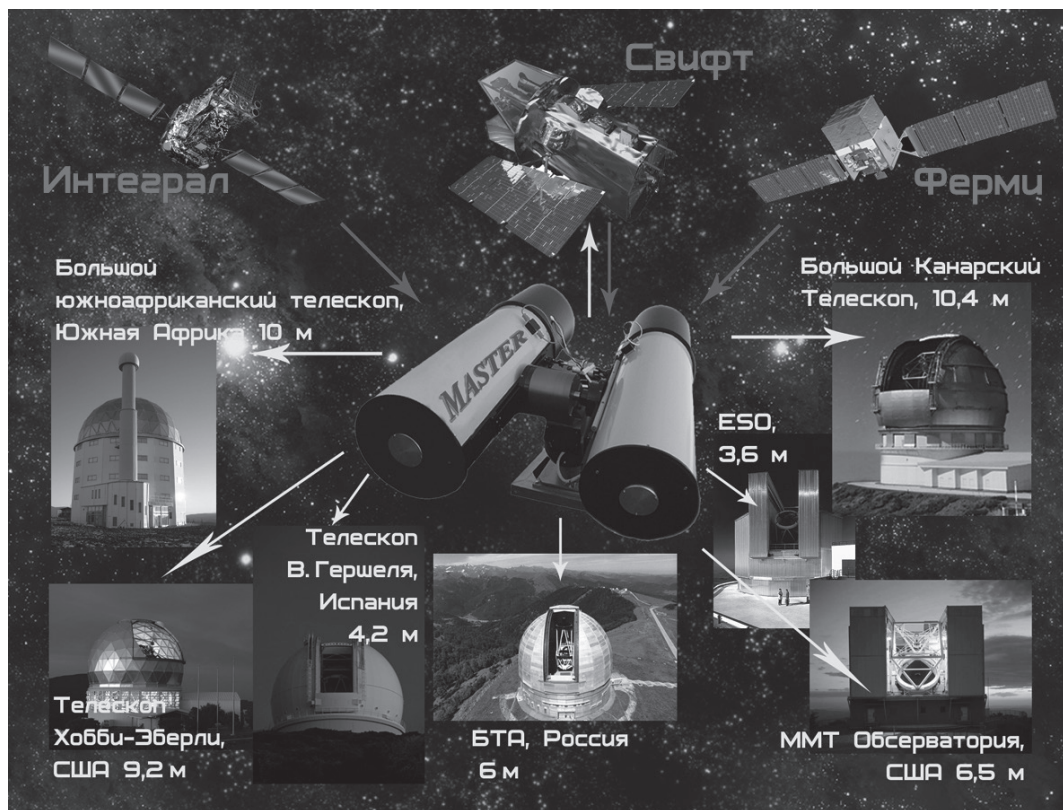
жить ограничения на собственные моменты вращения компонент – спины.

Увеличение точности измерений ГВ при повышении чувствительности действующих и строящихся ГВ-интерферометров впервые позволит проверить тонкие эффекты образования горизонта событий при слиянии пары ЧД в одну вращающуюся ЧД, например, путем измерения ГВ-"звона" от горизонта событий (релаксацию возмущений при его образовании в виде излучения ГВ со специфической зависимостью амплитуды и частоты от времени).

Последнее детектирование события от слияния двойных нейтронных звезд (17 августа 2017 г.) дало положительный результат в рентгеновском, гамма-диапазонах и в оптике, что впервые позволило определить относительно точные координаты килоновой (GW170817) и зафиксировать запаздывание гамма-всплеска от прихода ГВ на 1,7 с. Множество наземных телескопов (в том числе в сети "МАСТЕР") зарегистрировали свечение уровня килоновой (порядка 10^9 светимости Солнца; Земля и Вселенная, 2018, № 3).

Таким образом, регистрация ГВ от астрофизических источников "открыла" совершенно новые возможности для измерения параметров остатков звездной эволюции – нейтронных звезд и черных дыр, исследования путей их образования и эволюции, а также проверки фундаментальных теорий гравитации. Впереди – новые, возможно, самые неожиданные открытия. «Редко случается, чтобы ученому выпадало быть свидетелем начала новой эры в науке. Это один из таких случаев!» – сказала сотрудница Астрофизического института Италии (INAF) астроном Елена Пиан.

Обнаружение гравитационных волн может иметь не меньшее значение, чем открытие радиоволн. Возможность регистрации гравитационных волн позволяет надеяться на реализацию некоторых глобальных замыслов. Открывается новое окно во Вселенную, приближающее ученых к разгадке многих космологических тайн, появляется возможность создания новой гравитационно-волновой астрономии.



Глобальная сеть телескопов-роботов «МАСТЕР» МГУ, созданная в 2011 г. под руководством профессора В.М. Липунова.

Возможно, возникнет новый вид связи. Будут созданы генераторы и приемники гравитационных волн. Ученые надеются, наконец, выяснить, что такое темная энергия и темная материя? Они собираются "поймать" волны от Большого взрыва. Возможно, им удастся создать и теорию "Всего" или теорию "Всеобщего объединения". Последняя должна соединить в одно целое все четыре фундаментальных физических взаимодействия: гравитационное, электромагнитное, слабое и сильное.

Прямое экспериментальное обнаружение волн гравитации многие эксперты считают важнейшим научным достижением последних десятилетий и даже всего XXI в. 12 ноября 2017 г. на канале ОТР в передаче

"Гамбургский счет" известного российского ученого-астрофизика доктора физико-математических наук В.М. Липунова спросили: «С чем можно сравнить открытие гравитационных волн?» – «Пожалуй, с открытием связи электричества и магнетизма, после известных опытов Майкла Фарадея», – ответил профессор. И добавил: «Когда М. Фарадея спросили о практической пользе его открытия, он остроумно ответил, что не видит никакого практического применения...».

Статья подготовлена
редакцией журнала
на основе материалов ИКИ РАН

Испытания обсерватории Уэбба

8 марта 2018 г. инженеры извлекли оптические и научные блоки космической обсерватории им. Джеймса Уэбба (James Webb Space Telescope, JWST) с 6,5 м зеркалом в помещении компании "Northrop Grumman Aerospace Systems" в Калифорнии из транспортного контейнера. Начался заключительный этап испытания узлов будущего телескопа, занимающих половину обсерватории. К другой половине аппарата относят несущую конструкцию и солнечный экран. Эти узлы уже давно находятся здесь и проходят процесс окончательной сборки. Они проходят испытания, направленные на

подтверждение возможности объединить их с полезной нагрузкой. Затем, уже в сборке, пройдут еще испытания, которые должны подтвердить работоспособность всей обсерватории непосредственно в космическом пространстве, в точке L2. После этого собранная конструкция обсерватории будет доставлена во Французскую Гвиану, на космодром Куру, для запуска в мае 2020 г. с помощью РН "Ариан-5".

Обсерватории им. Джеймса Уэбба станет самой технически сложной из всех ранее запущенных. Раскрытие солнечного экрана, который имеет пятислойную структуру и размеры с теннисный корт, является одним из наиболее технически сложных этапов. В сложенном положении он аккуратно обвит вокруг телескопа, а его открытие требует точной работы примерно ста крошечных приводов, которые способны управлять микронными движениями. Солнечный экран должен быть развернут таким образом,

чтобы гарантировать защиту зеркала и научных приборов от солнечного света. Это необходимо для того, чтобы инструменты были довольно холодными, и "теплом не ослепляли" самих себя; они должны быть в состоянии обнаружить чрезвычайно слабый свет далеких экзопланет, звезд и галактик.

Для строительства сложной обсерватории потребовалось решить несколько проблем: оптические и научные инструменты должны работать в космосе при криогенных температурах, но их сборка должна происходить при комнатной температуре на Земле. Зеркала телескопа должны быть идеально отполированы и точно выставлены относительно друг друга, для того чтобы принимать сигнал. Солнечный экран будет развернут в невесомости, но все испытания проводятся в условиях гравитации Земли.

*Пресс-релиз NASA,
23 марта 2018 г.*

Памяти Ю.А. Гагарина

27 марта 2018 г. в Киржачском районе Владимирской области, у расположенного близ деревни Новосёлово Мемориала первому космонавту Юрию Гагарину и его летному наставнику летчику-инструктору Владимиру Серёгину состоялся митинг памяти "Прерванный полет", посвященный 50-й годовщине со дня трагической гибели летчиков. От имени полномочного представителя Президента в ЦФО Алексея Гордеева слова приветствия всем участникам митинга памяти передал его заместитель, Николай Овсиенко: «За 50 лет, которые прошли с момента гибели Юрия Гагарина, его



Почетный караул на митинге у Монумента на месте гибели Ю.А. Гагарина и В.С. Серёгина

имя стало символом нашего Отечества. Наша главная задача – чтить память героев и продолжать их дело по процветанию и величию нашей страны».

Все присутствующие поблагодарили президента Благотворительного фонда памяти Героев Советского Союза Ю.А. Гагарина и В.С. Серё-

гина, летчика-космонавта А.А. Леонова за неоценимый вклад в дело сохранения памяти о героях нашего Отечества. На протяжении многих лет Благотворительный фонд занимается реконструкцией Мемориала.

В митинге памяти приняли участие летчики-космонавты Б.В. Волинов и В.В. Терешкова. Валентина Владимировна сказала: «Пятьдесят лет, как нет нашего коллеги, поэтому мы все считаем своим долгом прийти и поклониться. Каждый год мы здесь собираемся, и спасибо всем, кто принимает участие, облагораживая это место». На



На митинге "Прерванный полет" выступает первая в мире женщина-космонавт В.В. Терешкова. Слева – певец Иосиф Кобзон.



Выступает с речью дважды Герой Советского Союза, летчик-космонавт Б.В. Волинов.

митинге выступили гости и представители власти. Народный артист СССР Иосиф Кобзон вместе с участниками мероприятия, которых, по оценкам организаторов, было около 2 тыс. человек, исполнил песню "Огромное небо". Завершился митинг возложением венков и цветов к подножию 16-метровой гранитной стелы, установленной на месте гибели героев (см. стр. 2 обложки), после чего в храме Андрея Первозванного состоялась Панихида. Также на территории мемориала была освящена часовня в честь Георгия Победоносца, заложенная ровно год назад рядом с местом падения самолета Ю.А. Гагарина.

Юрий Гагарин и Владимир Серегин погибли 27 марта 1968 г., пилотируя самолет МиГ-15 УТИ. На этом месте 17 октября 1975 г. был открыт Мемориал. По традиции каждый год в день годовщины на месте трагедии собираются космонавты, военнослужащие, местные жители и школьники со всей страны, для того

чтобы почтить память героев.

До сих пор не выяснены точные причины катастрофы, которая унесла жизнь первого землянина, побывавшего в космосе. Наряду с официальной версией существует несколько других, альтернативных. По официальным итогам расследования самолет совершил резкий маневр и сорвался "в штопор", вывести из него машину летчикам не удалось. По данным экспертов, не хватило 200 м высоты, — двух секунд полета, чтобы перевести машину в горизонтальное положение и избежать столкновения с землей. При этом техника была исправной, а химический анализ останков летчиков показал, что в их крови не было обнаружено следов посторонних веществ, их самочувствие было нормальным. Причина "ухода в штопор" оставалась неясной. Место крушения было найдено спустя 4 ч 20 мин после последнего сообщения летчиков. Эксперты установили, что при падении скорость МиГ-15 УТИ достигла 700–800 км/ч.

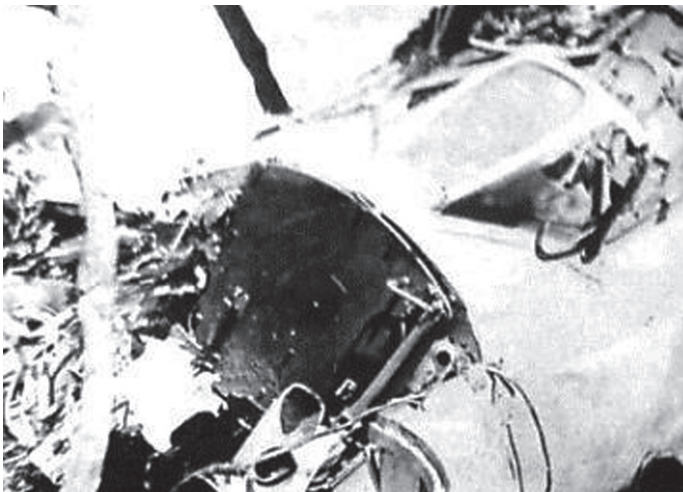
При столкновении с землей самолет разрушился, обломки техники находили на расстоянии до 200 м, а двигатель и переднюю кабину обнаружили в земле на глубине 7 м.

Напомним, что дипломную работу Ю.А. Гагарин защитил 17 февраля 1968 г. в Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского. Защита прошла весьма успешно, после этого появилась возможность вернуться к тренировочным полетам на самолетах. Юрий Алексеевич немедленно начал готовиться к ним и возобновил полеты уже 13 марта 1968 г. С 13 по 22 марта Ю. Гагарин совершил 18 полетов на учебно-тренировочном самолете-спарке МиГ-15 УТИ общей продолжительностью более 7 ч (см. стр. 2 обложки). Перерыв в полетах у него был с 27 ноября 1967 г. по 13 марта 1968 г. Контрольные полеты "в зону" и "по кругу" с Юрием Алексеевичем совершали 20 и 22 марта, общая оценка знаний и навыков — "отлично"; он был готов к самостоятельным полетам. Полет с командиром полка, Героем Советского Союза, летчиком-испытателем 1-го класса Владимиром Сергеевичем Серёгиным был последней контрольной проверкой, после которой Ю.А. Гагарин переходил к самостоятельным полетам. На 27 марта 1968 г. в его плановой та-

блице было предусмотрено выполнение двух контрольных полетов, по 30 мин каждый – оба на самолете МиГ-15 УТИ с В.С. Серёгиным.

Летное мастерство Владимира Сергеевича оттачивалось на фронте, где он успешно совершил около 200 боевых вылетов на самолете Ил-2, участвовал в 19 воздушных боях, сбил 3 самолета противника. В 1953 г. он окончил инженерный факультет в Академии им. Н.Е. Жуковского и, в соответствии с его желанием, был назначен в испытательный институт ВВС. В 1967 г. ему была присвоена квалификация летчика-испытателя 1-го класса, с 1964 г. он – военный летчик 1-го класса, причем эту квалификацию подтверждал опыт инструкторской работы (общий налет – более 4 тыс. часов).

Погода 27 марта 1968 г. оказалась хуже, чем это следовало из прогноза, известного летчикам и руководителю полетов. Полет происходил между двумя сплошными слоями облаков, очевидно, без видимости естественного горизонта. Должно быть поэтому, прилетев в зону, В.С. Серёгин сократил программу, отменив выполнение запланированного упражнения в полном объеме. Сказанное следует из радиобмена, в котором зафиксирован интервал времени между докладами о начале и об окончании выполнения задания



(в 4 мин 20 с). Кроме того, из схем и рапортов руководителя полетов и других официальных лиц следует, что Ю.А. Гагарин в зоне выполнил два виража. После того, как самолет МиГ-15 УТИ перестал выходить на связь и пропал с радаров, стало понятно, что произошло что-то серьезное. На аэродроме Чкаловский стали собираться высшие чины ВВС, в районе Киржача самолеты и вертолеты проводили поисковую операцию. В 14 ч 50 мин командир вертолета Ми-4 доложил: «Обнаружил обломки самолета Гагарина в 64 километрах от аэродрома Чкаловский и в трех километрах от деревни Новосёлово». Тем же вечером в Москве состоялась кремация останков. Утром 29 марта началось прощание с погибшими в Краснознаменном зале Центрального Дома Советской Армии. 30 марта 1968 г., при огромном стечении народа, урны с прахом Ю.А. Гагарина и В.С. Серёгина были захоро-

нены в нишах Кремлевской стены на Красной площади. Трехдневный траур, объявленный в стране, впервые в истории СССР не был связан с кончиной представителя высшего руководства.

Необходимо подчеркнуть, что расследование обстоятельств этой катастрофы не имеет равных в отечественной и зарубежной практике по тщательности, глубине и обоснованности выполненных работ. В районе падения был тщательно организован сбор деталей самолета. На исследование поступило около 95% сухой массы пустого самолета (обычно при расследовании авиакатастроф удавалось собрать не более 70%). Расследование вели две подкомиссии, которые имели возможность привлекать к работе самых квалифицированных специалистов, любые научные институты и компетентные организации. Результаты самых разнообразных исследований собраны



Похороны Ю.А. Гагарина и В.С. Серёгина у Кремлевской стены.

и обобщены в 29-ти солидных томах; они содержат подробные данные анализов, расчетов, мнений, опросов свидетелей, выводов и заключений, скрепленных подписями авторитетных ученых, военачальников, партийных работников, летчиков, космонавтов, инженеров, врачей, экспертов. Подход был столь многоплановым, разносторонним и тщательным, привлечено было так много объективных показателей, что любая попытка использовать сомнительные материалы или недостоверные сведения немедленно отпадала.

Остановимся только на главных вопросах и тех ответах, которые были на них получены. Особо выделим одно очень важное заключение комиссии: «Попытка

катапультироваться летчиками не предпринималась». Достоверно установлено, что за минуту до гибели Гагарин пребывал в совершенно нормальном состоянии: речь его была спокойной.

Экспертами выдвинуты три наиболее вероятные причины аварии. При подходе к верхней границе нижнего слоя облачности неожиданно возникло препятствие: летящий самолет, шар-зонд илистая птица. И хотя в процессе расследования установлено, что столкновения не было, исключить сближение нельзя, это могло привести к резкому маневру и выходу самолета на закритические углы атаки и его "сваливанию" в штопор. Второй из возможных причин могло быть "попадание в след" пролетевшего ря-

дом самолета. С конца крыла у каждого самолета "сбегают" концевые вихри, летчики хорошо знают, что нельзя попадать в сферу действия концевых вихрей летящего впереди самолета, иначе возникает столь мощное воздействие закрученного потока, что справиться с ним почти невозможно: самолет сорвется в штопор.

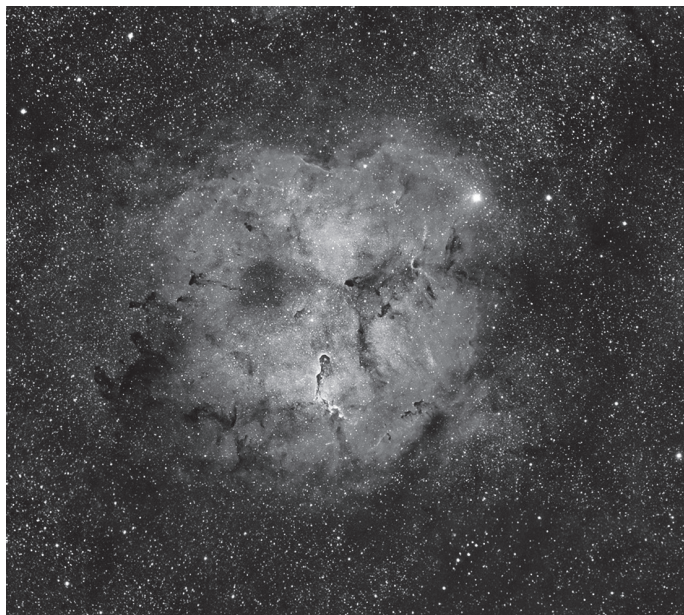
Третьей причиной выхода самолета на закритические углы мог стать восходящий вертикальный поток воздуха, который при горизонтальном полете увеличивает "углы атаки". В условиях приближавшегося в тот день холодного фронта исключать подобные явления в атмосфере было нельзя. Могло иметь место сочетание двух или трех каких-либо из указанных причин. Отметим, что материалы следствия до сих пор засекречены.

Последний полет Ю.А. Гагарина и В.С. Серёгина длился всего 12 мин, в котором критической стала одна минута. В этой ситуации уже в последний раз подвергалось жестокой проверке сразу все лучшее, что есть в людях: честь, совесть, верность, мастерство, мужество. И этот последний экзамен, который уготовила героям безжалостная судьба, они оба выдержали достойно.

«Радиоастрон»: находка водяного мазера

Российская космическая обсерватория "Радиоастрон" (совместно с сетью наземных радиотелескопов из нескольких стран) исследовала эмиссионную туманность IC 1396 – область активного звездообразования "Цефей А" (по имени созвездия), находящуюся на расстоянии около 2 тыс. св. лет от Земли в линии излучения молекулы воды на частоте 22 ГГц. Впервые удалось обнаружить сверхмелкие детали структуры, когда-либо наблюдавшиеся в галактических мазерах; в источнике мазерного излучения, в линии водяного пара, на частоте 22 ГГц двойная деталь содержит компоненты, сравнимые по размерам с Солнцем.

Ранее в этой области в радиодиапазоне уже было обнаружено 16 компактных источников теплового радиоизлучения, большинство которых, скорее всего, – новорожденные звезды класса О или В в "коконе" из родительских газопылевых облаков. Эти объекты были описаны в статье V.A. Hughes & J. Wouterloot "The star-forming region in Cepheus A" (Астрофизический журнал, 1984. Т. 276. С. 204–210), по-



Эмиссионная туманность IC 1396 "Цефей А", находящаяся на расстоянии около 2 тыс. св. лет от нас. Она содержит внутри себя еще одну туманность, IC 1396 А, – область ионизованного газа с несколькими очень молодыми звездами. Обе туманности активно взаимодействуют, так как массивные звезды эмиссионной туманности IC 1396 ионизируют область IC 1396 А. Снимок получен в 1993 г. в Паломарской обсерватории (Калифорния, США).

тому таким объектам присвоены названия, начинающиеся с HW. Многие такие объекты являются источниками излучения мазеров воды и гидроксила, тогда как в HW2 ранее было зарегистрировано излучение метанольных мазеров, то есть источников мазерного излучения в радиолиниях метилового спирта.

В ноябре 2012 г. эта область звездообразования была исследована с помощью "Радиоастрона" совместно с тремя наземными радиотелескопами, расположенными в России, Италии и в Испании. В

результате удалось обнаружить три очень компактных мазерных детали; одна из них была связана с областью HW2, где расположен массивный протопланетный диск. Всего в этом объекте удалось разглядеть два сверхкомпактных ярких пятна мазерного излучения, каждое из которых имеет размеры, сопоставимые с диаметром Солнца.

В межзвездном газе тоже могут возникать условия для генерации мазерного излучения в линиях некоторых молекул: в протозвездных и протопланетных дисках, в

областях звездообразования, в оболочках проэволюционировавших звезд, в остатках сверхновых, в окрестностях сверхмассивных черных дыр, в других галактиках. Наиболее сильное излучение наблюдается в линиях воды (H_2O), гидроксидов (OH), метанола (CH_3OH) и окиси кремния (SiO).

Для работы космического мазера необходим постоянный приток энергии, который создается путем "накачки" излучения, например, от молодой звезды и/или от столкновения с молекулами газа. Необходим также отток энергии, что обеспечивает проявление циклов "накачки"; а

также достаточно большие размеры самих облаков газа, где может генерироваться излучение. С точки зрения наблюдателя мазерные линии выглядят как обычное излучение, но яркостная температура наблюдаемого источника может достигать сотен триллионов градусов; в действительности излучающий газ имеет относительно низкую температуру – обычно не более нескольких сотен градусов. Из-за их небольших угловых размеров (в несколько миллисекунд дуги и меньше), очень высоких плотностей потока (до тысяч Янских), узкой ширины линии (обыч-

но около 0,5 км/с и меньше) и отсутствия поглощения пылью мазеры "позволяют" исследовать кинематику и физические параметры областей звездообразования по всей Галактике (и даже околоядерных областей в других галактиках). Скорее всего, поток газа от близкой массивной молодой звезды «наталкивается» на препятствие, в результате чего происходит взаимодействие струи газа, например, с аккреционным диском вокруг другой звезды.

*Пресс-релиз АКЦ ФИАН,
28 марта 2018 г.*

Информация

Трехмерная модель солнечной ударной волны

Группа астрономов под руководством Жюнь-Ян Квона из Университета Джорджа Мейсона (США) построила трехмерную модель, показывающую движение в направлении от Солнца ударной волны, возникающей после коронального выброса массы. Для этого астрономы выбрали два события – 7 марта 2011 г. и 25 февраля 2014 г. – и использовали данные, получен-

ные с помощью четырех космических аппаратов: "STEREO-A и -B", "SDO" и "SOHO".

Во время коронального выброса в межпланетное пространство уносится огромное количество вещества из верхних слоев Солнца. Если поток заряженных частиц достигает Земли, то в ее атмосфере возникают полярные сияния и магнитные бури. Сегодня известно, что солнечные вспышки и корональные выбросы могут вызывать серьезные сбои в работе электрооборудования; кроме того, поток заряженных частиц представляет серьезную угрозу для космонавтов, поэтому необходимо изучать явления космической погоды и учиться как можно точнее их моделировать.

Рассматривались две модели: поведение ударной волны

в момент рождения (когда та принимает форму раковины) и в момент активного распространения ее по поверхности Солнца (эллипсоидная модель). Исследовались распределение плотности вещества во время выброса и геометрия ударных волн. Согласно модели, скорость движения ударных волн достигала 2050 км/с, их минимальная угловая ширина равна 192–252°.

Новые данные помогут точнее прогнозировать распространение солнечного вещества и предсказывать, сколько плазмы может достигнуть Земли. Это позволит сделать работу космонавтов более безопасной.

*Пресс-релиз NASA,
12 марта 2018 г.*

Вода появилась сразу после рождения Земли

Профессор Ричард Гринвуд из Открытого университета Великобритании (Милтон-Кинс) выдвинул теорию, что вода на Земле смогла сохраниться после "отделения" Луны от нашей планеты и бомбардировки ее астероидами и кометами, что заметно повысило "шансы" существования внеземной жизни. Оказалось, что вода – невероятно "живуча": она не исчезнет, даже если "расплавить" и "испарить" планету.

Земля и прочие планеты Солнечной системы сформировались внутри газопылевой туманности, окружавшей новорожденное Солнце в первые несколько сотен мил-

лионов лет его жизни. Изначально Земля представляла собой раскаленный шар, на поверхности которого просто не могли существовать летучие элементы и вещества (в том числе вода, углерод и соединения азота, а также органические "кирпичики жизни"). Возникает вопрос: почему тогда все эти вещества встречаются на поверхности Земли и в ее коре в изобилии?

Р. Гринвуд и его коллеги выяснили, что это не так. Они обнаружили, изучая фрагменты лунных пород, доставленных на Землю астронавтами в ходе программы "Аполлон" (Земля и Вселенная, 1989, № 5; 2009, № 5), что первоначально запасы воды на Земле появились задолго до этого, практически во время рождения планеты. Геологов интересовало одно важное свойство этих пород – то, как много кислорода в них присутствует. При сравнении доли изотопов кислорода в лунных породах, метеоритах и в образцах грунта, извлеченных со дна Мирового

океана, доли изотопов кислорода в земных и лунных породах были почти равными – они отличались всего на 3 части на миллиард, или на 0,0000003%.

Это говорит о двух вещах: вода присутствовала на Земле задолго до ее столкновения с Луной или отделения Луны от Земли; астероиды и кометы, действительно, "доставили" воду на Землю, но лишь небольшую ее часть – около 5%, что никак не повлияло на облик планеты и на количество воды на Земле.

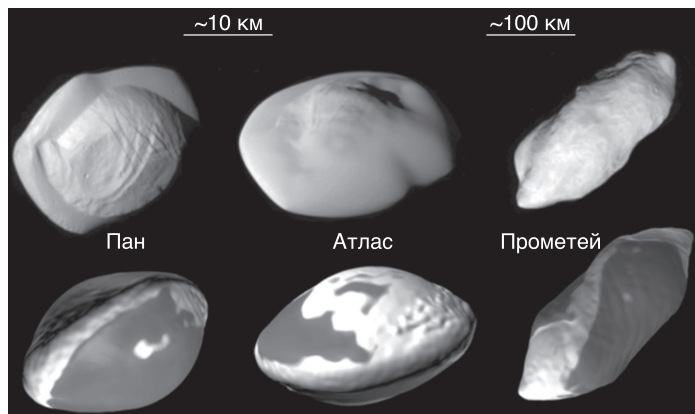
Подобное открытие, как отмечают планетологи, ставит перед нами больше новых вопросов, чем дает ответов. Теперь не понятно, почему вода не испарилась в космос на первых этапах формирования Земли? Возможно, наша планета родилась на гораздо более далеком расстоянии от Солнца, чем было принято считать.

*По материалам
журнала "Science Advances",
2018. Т. 230. № 2.*

Как возникли малые спутники Сатурна

На сегодняшний день астрономам известно о существовании 62 спутников у Сатурна (Земля и Вселенная, 2008, № 2). Многие из них, например, небольшие внутренние спутники (такие, как Атлас, Прометей, Пандора, Янус или Эпиметей), обладают необычной формой и рельефом. В частности, на снимках, полученных в 2007–2017 гг. АМС «Кассини», у Атласа и Пана видны экваториальные пояса, похожие на горные хребты и придающие им сходство по форме с пельменями. Такой же пояс наблюдается у более крупного спутника Япета диаметром 1468 км. До сих пор не установлена точная природа этих особенностей рельефа спутников.

Существуют две теории, объясняющие столь странную форму спутников: поскольку Сатурн гораздо массивнее Земли (внутренние спутники расположены ближе к планете, чем Луна к Земле), то необходимо учитывать влияние мощных приливных сил со стороны газового гиганта, которые могли способствовать формированию вытянутой формы спутников или постепенному наращиванию вещества в экваториальной области. Однако,



Спутники Сатурна Атлас, Пан и Прометей. Снимки получены в 2007–2017 гг. с помощью АМС «Кассини» (вверху); результаты моделирования столкновений двух тел сходных размеров, приведших к образованию спутников (внизу). Выделенные белым цветом области указывают на вещество, выброшенное на поверхность из недр тел, а темным – на менее затронутую столкновением поверхность. Фото и рисунки NASA/JPL.

это привело бы к образованию эллипсоидов Роша (формы дыни), непохожих на истинные формы спутников. Альтернативная модель образования, называемая пирамидальным режимом (*pyramidal regime*), предполагает, что эти спутники образовались в результате серии слияний более мелких тел схожих размеров во время их миграции от колец – к газовому гиганту, что соответствует данным, полученным в результате исследований, полученных с помощью АМС «Кассини».

Группа астрономов во главе с А. Лелеу (Бернский университет, Швейцария) решила проверить достоверность пирамидальной теории: ученые смоделировали столкновения двух небольших тел сходных размеров, с их последующим

слиянием. Выяснилось: для того, чтобы спутник стал похож на гигантский летающий «пельмень» (был относительно плоским и имел экваториальный пояс, как 35-км спутник Пан), было необходимо лобовое столкновение двух тел сходных размеров, движущихся со скоростью около 10 м/с, под углом не более 10° – иначе тело будет нестабильно и разрушится под действием приливных сил Сатурна. В случае Пана и Атласа их экваториальные пояса образовались из вещества, "выброшенного" наружу во время столкновения тел. Плотность объектов, возникающие в результате слияний в моделях, составляют около $400\text{--}600\text{ кг/м}^3$, что согласуется с наблюдениями. Пандора, Янус и Эпиметей

имеют вытянутую форму; они образовались в результате лобового столкновения двух тел; в результате тела разрушились и произошла аккреция выброшенного вещества. Что же касается Япета, то результаты моделирования показывают, что его сплюснутая форма и экваториальный пояс так же

могут быть результатом почти лобового столкновения и последующего слияния двух тел похожих размеров и масс; однако, он не мог образоваться на своей, текущей орбите. Предполагается, что Япет, вероятно, сформировался до того, как стал иметь значительный наклон относительно эквато-

риальной плоскости Сатурна. Ученые сделали вывод, что малые спутники Сатурна образовались именно после их столкновения с мелкими телами.

По материалам журнала
«Nature Astronomy»
2018. Т. 2. № 5.

Ф.СП-I	АБОНЕМЕНТ		70336 (индекс издания)																								
	на <u>газету</u> на <u>журнал</u>		Количество комплектов 																								
	Земля и Вселенная (наименование издания)																										
	на ____ год по месяцам:																										
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td> </tr> <tr> <td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																
Куда 																											
(почтовый индекс)		(адрес)																									
Кому 																											
(фамилия, инициалы)																											
	ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА																										
	на <u>газету</u> на <u>журнал</u>		70336 (индекс издания)																								
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; padding: 2px;">ПВ</td> <td style="width: 33%; padding: 2px;">место</td> <td style="width: 33%; padding: 2px;">литер</td> </tr> <tr> <td style="height: 20px;"></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		ПВ	место	литер				Количество комплектов 																		
	ПВ	место	литер																								
	Земля и Вселенная (наименование издания)																										
	Стоимость	подписки пере- адресовки	____ руб. ____ коп. ____ руб. ____ коп.	Количество комплектов 																							
	на ____ год по месяцам:																										
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td> </tr> <tr> <td style="height: 20px;"></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12															
Куда 																											
(почтовый индекс)		(адрес)																									
Кому 																											
(фамилия, инициалы)																											

Дорогие читатели!

*Напоминаем, что подписаться на журнал
"Земля и Вселенная" вы можете с любого
номера по Объединенному каталогу
"Пресса России"
(I полугодие 2019 г.) во всех отделениях связи.
Подписаться можно и по интернету,
воспользовавшись каталогом журналов
на сайте "Почта России".
Подписной индекс – 70336*

Литературный редактор Л.В. Рябцева
Зав. отделом космонавтики и геофизики С.А. Герасютин

Художественный редактор О.Н. Никитина

Оператор ПК Н.Н. Токарева

Верстальщик Е.В. Иванова

Корректор О.Н. Добринова

Обложку оформила О.Н. Никитина

Сдано в набор 23.04.2018. Подписано к печати 30.08.2018

Формат 70 × 100¹/₁₆; Усл. изд.л. 12,1

Тираж 250 экз., (включая бесплатных 5 экз.). Заказ 13/4а. Цена свободная

Учредители: Российская академия наук, Президиум

Издатель: Российская академия наук

Адрес редакции: 117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

Телефон: (495) 276-77-28 доб. 42-31 или 42-32

E-mail: zevs@naukaran.com

Исполнитель по контракту № 4У-ЭА-014-18

ООО «Интеграция: Образование и Наука»

117418, Москва, Нахимовский проспект, д. 47

Отпечатано в ООО «Институт информационных технологий»



